ЗА РАБОЧИМ СТАНКОМ
ДЛЯ РАБОЧИХ ВЫСШЕЙ КВАЛИФИКАЦИИ
№ 70

В. А. КАРПОВ
ИНЖЕНЕР-ЭЛЕКТРИК

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

121 ЗАДАЧА И 122 РИСУНКА

Издание третье
исправленное и дополненное

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД — 1931

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Применения электричества весьма разнообразны. Его главнейшие приложения составляют специальные отделы электротехники, являющиеся предметом особого изучения. Но какой бы отдел электротехники ни приходилось изучать, для лучшего и скорого его усвоения необходимо обладать основными понятиями об электрических явлениях и твердо знать основные законы электротехники. Имея в виду дать эти *основы* электротехники, автор изложил в настоящей книге соответствующий материал, усвоение которого должно облегчить понимание электрических явлений и дальнейшее изучение различных отделов электротехники, и в тех же целях дал примеры и задачи, подбирая их применительно к различным случаям электротехнической практики. Эта «азбука электротехники», дать которую является целью настоящей книги, должна быть известна всем и каждому, так как электричество играет, в связи с широким проведением электрификации, весьма серьезную и крупную роль и пользование им должно быть сознательным и умелым.

Электрификация, т. е. применение электричества, захватывает у нас самые разнообразные области промышленности и сельского хозяйства, входя вместе с тем и в повседневный быт широчайших масс населения. Рост потребления электрической энергии, все возрастающий на нее спрос вызывает к жизни все новые и новые электрические станции и приводит к созданию новых и к развитию имеющихся уже электрических сетей. Заключительный параграф настоящей книги дает справку о нашей программе строительства электрических станций и о нашей электропромышленности, имеющей своей целью удовлетворить потребность в различного рода изделиях, применение которых связано с производством, распределением и потреблением электрической энергии. Электротехникам предстоит серьезная и интересная работа в различных областях народного хозяйства по различным узким специальностям единой науки — электротехники. Но какая бы то специальность ни была, производство ли изделий, монтаж ли электрических устройств или их эксплоатация, работник должен быть во всеоружии знаний.

Электропромышленность в СССР является в подлинном смысл детищем Октябрьской революции, так как от старой царской России мы ничего почти не получили.

Рост продукции этой молодой отрасли промышленности виде из следующих цифр ее валового выпуска: 1928 — 1929 г. да 263 млн. руб., 1929 — 1930 г. — 471 млн., третий решающий го пятилетки — 1 миллиард руб. Полтора миллиона киловатт уста новленной мощности районных станций на 1 января 1931 г. 7 млн. киловатт к концу пятилетки, 35 — 40 млн. киловат в 1937 г. — вот те гигантские шаги, которыми будет двигатьс наше энергохозяйство.

Электропромышленности нужны квалифицированные техниче ские кадры, — это одно из узких мест нашей энергетики. Необ ходимо тщательное изучение основ электротехники, в особенности низшим и средним техническим персоналом. Настоящая книга, расчитанная на квалифицированного рабочего электропромышленности, поможет работникам наших электростанций и заводов разобраться в основных вопросах электротехники.

Автор настоящей книги советует читателю изучать ее параграф за параграфом, не торопясь, тщательно продумывая прочтенное и проверяя себя по тем вопросам, которые в качестве контрольно-повторительных помещены после соответствующих групп параграфов. Приводимые в книге схемы, т. е. чертежи, на которых упрощенно изображены какие-либо машины, приборы, провода их соединяющие и пр., должны быть читателем перерисованы и также продуманы, а задачи решены по возможности самостоятельно с последующей их проверкой по приведенным в книге решениям. Желательно, чтобы читатель и сам по возможности к каждой задаче придумывал подходящую подобную ей другую с иными цифровыми данными. Решение задач имеет целью закрепление знания, проверку усвоенного и приобретение некоторых навыков в числовых расчетах, нередко являющихся затруднительными для практиков.

Инженер-электрик В. Карпов.

---

§ 1. О природе электричества.

Есть много вопросов, на которые наука пока не может дать точного и определенного ответа, который не оставлял бы сомнений в его полной истинности.

В области электротехники наука также не может дать окончательного ответа на вопрос, что такое электричество. Одним из ответов на этот вопрос был в свое время тот, что электричество есть невидимое и невесомое вещество, подобное жидкости. Когда электричество передается по проводнику, значит, эта жидкость течет по проволоке. Отсюда и слова «электрический ток». Это старинное воззрение на природу электричества как на жидкость теперь оставлено, но следы от него в виде понятия «электрического тока» остались, при чем последнему, как увидим ниже, придается другой смысл.

В настоящее время обычно в практике говорят лишь об особом, *электрическом состоянии* тел, при чем причина этого состояния попрежнему не считается вполне выясненной. И это нечто, являющееся причиной электризации тел или причиной прохождения электрического тока, называется в науке электричеством. Для техники, в сущности, безразлично, как объясняется причина электрических явлений. Для повседневной электротехнической практики достаточно установить, что природа или сущность электричества может быть объяснена и объясняется лишь предположительно. Поэтому о современных воззрениях на природу электричества нами будет сказано кратко, и далее мы перейдем к изучению теории электричества лишь в части ее, необходимой для повседневной электрической практики.

Наукой давно установлено, что всякое вещество состоит из мельчайших составных частей, называемых *молекулами*, которые в свою очередь составляются из *атомов*. По современным воззрениям, каждый из этих атомов представляет собой группу мельчайших электрических частичек, некоторую сложную систему, подобную солнечной. В атоме есть центральное тело, вокруг которого, подобно планетам вокруг солнца, и носятся мельчайшие электрические частички — так называемые внешние *электроны*. Центральное тело или ядро является носителем положительного

электрического заряда, электроны представляют собою отрицательные заряды (о положительном и отрицательном электричестве будет еще сказано ниже). Число внешних электронов в атоме даст т. н. номер элемента; с ним связаны те свойства, по которым мы данное тело помещаем, как химический элемент, (вещество, никаким путем не разлагающееся на более простые) в определенном месте таблицы элементов Д. И. Менделеева. Таким образом система элементов этого знаменитого химика является чисто электрической системой, в которой положение и номер элемента обусловливается числом электронов — отрицательных зарядов. Наука даже подсчитала величину отрицательного заряда каждого электрона и установила, что положительный заряд ядра атома равен сумме зарядов электронов. В атоме, следовательно, действуют исключительно электрические силы, и потому все силы взаимодействия между атомами, являющиеся причинами свойств и состояния вещества, как силы сцепления, упругости, поверхностного натяжения и даже химические, суть силы электрического притяжения и отталкивания ядер электричества. Таким образом наука полностью как бы электрифицировала атом, и наш советский ученый академик А. Ф. Иоффе в одном из своих докладов «Строение материи» отметил: «ничего более электрического, чем материя, пожалуй, и не существует».

Итак, атом есть первоисточник электричества. Все наблюдения, опыты, рассуждения и расчеты приводят ученых к тому, что электрический ток представляет движение электронов, отрицательно заряженных, в направлении, противоположном общепринятому направлению тока. Таким образом мы имеем действительное течение электричества, и старое понятие «электрический ток» как будто снова оказывается небеспочвенным. Когда в теле находится нормальное для данного элемента количество электронов—обнаружить их нельзя. Когда же в теле замечается их избыток или недостаток, то тело оказывается обладателем особого вида энергии, которая носит название электрической и которая не ощущается нашими органами чувств. Эта энергия, лучше всякой другой, волею человека передается на далекие расстояния и в весьма недоступные места как в больших количествах, так и в очень незначительных долях, эта энергия способна к чрезвычайно скорому и почти полному превращению в другие виды энергии, как свет, тепло, механическое движение и т. д.

§ 2. Источники электрической энергии.

Электричество представляет собою, как свет или теплота, одну из форм энергии. В природе электричество проявляет себя разря-

ами в виде молнии и северного сияния и в виде, так называемого, атмосферного электричества. Исследования атмосферы, т. е. воздушной оболочки, окружающей землю, показали, что между землей и верхними слоями воздуха, а также между рядом лежащими воздушными слоями почти всегда имеется известное электрическое напряжение (см. § 4). Если последнее достигнет большого значения, то электричество дает разряды с остриев. Такие спокойные разряды, известные под именем огней Эльма, можно наблюдать при бурях и грозах, при снежных бурях на громоотводах, мачтах судов. На высоких горах они проявляются на высоких постройках, деревьях и на людях. Попытки использования атмосферного электричества для нужд человечества предпринимаются, но пока дальше опытов не пошли и какого-либо практического значения не имеют. И получение электрической энергии человечество осуществляет иными путями.

Электрическую энергию мы можем получить преобразованием различных форм энергии, почему для получения ее могут служить различные источники.

В электрических машинах с трением, известных обыкновенно из курсов физики, происходит преобразование механической энергии в электрическую. Машины эти являются, однако, лишь предметом изучения и практического значения почти не имеют. Другое дело — машины, преобразующие механическую энергию в электрическую путем движения проводников между полюсами магнитов или электромагнитов. Это будут так называемые *динамомашины* (электрические генераторы), или применяемые при двигателях внутреннего сгорания *магнето*, или нашедшие широкое применение в телефонном деле *индукторы*. Если роль вторых (магнето) весьма узкая, если назначение индукторов также узкоспециальное, то роль первых из них, как источников (генераторов) тока, является первенствующей. Следующими по степени важности, по приложению в жизни, являются *химические* источники тока — *аккумуляторы и гальванические элементы*, в которых электрическая энергия получается преобразованием из химической. И, наконец, наименьшее распространение получили тепловые источники электрической энергии — *термоэлементы*, область применения которых ограничена весьма узкими рамками.

Отметим еще, что механическая энергия, преобразуемая в электрическую, может получаться самыми разнообразными путями — от паровых машин, силы падения воды, ветряных двигателей и проч.

Каковы бы ни были источники электрической энергии, передача ее производится, однако, во всех случаях по одним и тем же основным законам, которые и излагаются в настоящей книге.

§ 3. Основные части электрических устройств.

Если электрическая энергия не подается в данную установку со стороны, то для получения ее должен быть свой источник энергии. Устройства слабого тока, как, например, звонковая или пожарная сигнализация, телефонные установки, во всех случаях имеют обыкновенно собственные источники тока (гальванические элементы или аккумуляторы). Установки осветительные или для передачи силы (с электродвигателями) весьма часто имеют собственную *электрическую станцию* с динамомашинами. Такая электрическая станция, являясь частью устройства, представляет собою уже целое электрическое сооружение.

Части установки, потребляющие электрическую энергию, называются *приемниками электрической энергии*. К ним относятся электродвигатели, лампы накаливания и дуговые, электрические печи, нагревательные приборы, ванны для электрохимических процессов, электромагнитные механизмы, как, например, звонки, гудки, и проч.

Так как приемники электрической энергии всегда находятся от источников тока в большем или меньшем отдалении, то передача энергии к ним осуществляется по проводам. Вся совокупность проводов, служащих для передачи, составляет *электрическую сеть*. В небольшой установке, если она имеет лишь пару проводов (линию), не говорят об этой линии как о сети. В больших установках электрическая сеть становится весьма сложною и составляет как бы специальное устройство, подчас с многочисленным обслуживающим ее персоналом.

Таким образом станция, сеть и приемники являются основными частями электрической установки в целом. Все вместе они составляют электрическую цепь: источники тока — *внутреннюю* цепь и приемники — *внешнюю цепь*.

§ 4. Электродвижущая сила, разность потенциалов, или напряжение.

Когда по цепи происходит передача электрической энергии, говорят: «по цепи идет ток». Та причина, которая вызывает образование электричества в источниках тока и заставляет этот последний итти по цепи, если она замкнута, т. е. представляет непрерывный путь для тока от источника тока по проводам к приемникам и обратно, называется *электродвижущей силой* (для краткости мы будем писать э.д.с.). Так как отдельные части цепи оказывают току при его прохождении сопротивление, то часть э.д.с. и расходуется на преодоление этих

сопротивлений. Внутренняя цепь, или самые источники тока, также оказывает сопротивление, поэтому часть э.д.с. расходуется и на внутреннее сопротивление или, как иначе говорится, происходит *потеря напряжения* на внутреннее сопротивление. Вся остальная часть э.д.с. идет на преодоление сопротивлений внешней цепи; она называется *напряжением* или *разностью потенциалов* машины, элемента и т. д. у его зажимов.

Прежнее название э.д.с. — электровозбудительная сила. Посмотрим какова причина возникновения силы, вызывающей прохождение тока по цепи. Ее наличие обусловливается разностью электрических состояний (потенциалов) у полюсов машины, гальванического элемента или другого источника тока. Для объяснения электрических явлений обратимся к примерам из более близкой нам области. Представим себе два барабана A и B, соеди-

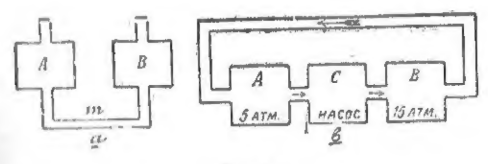


Рис. 1.

ненных трубой (рис. 1a). Если оба они сообщаются с внешним воздухом или атмосферой, то давление воздуха в них одинаково, и по соединительной трубе m движения воздуха не будет. Если же барабаны герметически (совершенно плотно) закрыты и в одном давление воздуха больше, чем в другом, то *разница давлений* вызовет перемещение воздуха из одного барабана в другой. Чем эта разница давлений, измеряемая особым прибором (манометром), больше, тем сильнее воздушный «ток» по соединительной трубе. Если мы будем поддерживать в барабанах A и B (рис. 1b) разницу давлений постоянной, например, путем откачивания воздуха в одном барабане и накачивания в другой при помощи насоса C, то перемещение воздуха тоже будет постоянным. Таким образом постоянная разность давления будет той силой, которой вызывается постоянное перемещение воздуха. Ее поэтому можно было бы назвать воздуходвижущей силой. Подобно этому, в двух сообщающихся сосудах A и B (рис. 2a) разность уровней вызывает перемещение жидкости из одного сосуда в другой. Так и теплота переходит от одного тела к другому, раз между ними

есть разность температур. Точно так же и в электрической практике разница электрического состояния, разница в степени электризации двух тел или разность потенциалов вызывает перемещение электричества. На рис. 2*b* мы имеем динамомашину *D*, на рис. 2*c* — гальванический элемент, обозначенный той же буквой *D*. При работе этих источников электрической энергии возникающая в них постоянная э.д.с заставляет итти ток по цепи в направлении, указанном стрелкой. Часть э.д.с. расходуется на преодоление сопротивления внутренней цепи *ADB* или, как говорится, расходуется на внутреннее сопротивление источника тока. За вычетом этой потери из э.д.с. получаем вторую ее часть, которая расходуется во внешней цепи *ALB*. Ясно, что эта часть, или напряжение во внешней цепи, будет меньше э.д.с. в целом. В нашем случае напряжение это будет расходоваться частично в проводах *AL* и *BL* и главным образом в лампочке *L*. Расход напряжения в проводах называется «потерей напряжения» или «падением напряжения» в проводах. Он, как и часть э.д.с., расходуемая на внутреннее сопротивление источника тока, должен быть небольшим. Наоборот расход напряжения в лампе *L* должен быть по возможности большим, так как в обоих случаях (рис. 2 *b* и *c*) целью работы источников тока является работа именно для лампочки накаливания.

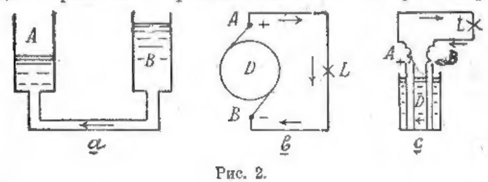


Рис. 2.

§ 5. Закон Ома. Единицы силы тока, сопротивления и э.д.с.

Рассматривая рисунки 1*b* и 2, мы приходим к заключению, что количество воды, воздуха или электричества, протекающее через поперечное сечение трубы или проводника, будет зависеть от разности давлений воздуха, уровней воды, электрических состояний и от величины сопротивления пути прохождения. Если обозначим э.д.с. буквой *E*, силу тока — *I* и сопротивление — *R*, то в отношении электричества можем сказать: чем больше напряжение *E*, тем сильнее ток *I*; чем больше сопротивление *R*, тем слабее ток *I*. Как зависят друг от друга

эти величины или, как говорят, зависимость между ними, согласно *закону Ома*, выражается, если соответственно подобрать единицы для измерения силы тока, э.д.с. и сопротивления так:

$$\text{сила тока } (I) = \frac{\text{э.д.с. } (E)}{\text{сопротивление цепи } (R)} \qquad (1)$$

или короче:

$$I = \frac{E}{R}. \qquad (2)$$

Приведенная формула дает нам возможность по двум заданным величинам определить третью, если мы сумеем току, э.д.с., или напряжению, и сопротивлению дать численное значение. В зависимости от того, что принято за неизвестное, т. е. какую величину мы ищем по двум остальным известным, формула может принять троякий вид:

$$1)\ I = \frac{E}{R}; \qquad 2)\ E = IR; \qquad 3)\ R = \frac{E}{I}.$$

Для того, чтобы пользоваться этими формулами, необходимо установить единицы силы тока, э.д.с. и сопротивления.

Сила тока на практике измеряется *амперами*. За единицу силы тока (1 ампер) принимают ток такой силы, который, действуя на раствор азотносеребряной соли, в 1 секунду выделяет 1,1183 мг чистого серебра. Представим себе ванну с раствором этой соли (рис. 3*a*), в которую опущены серебряная пластинка *A* и металлическая коробка *K*. Если через ванну пропустить ток от элемента *E* в направлении, указанном стрелками, то коробка *K* будет покрываться таким слоем серебра, а серебро пластинки *A* будет расходоваться на непрерывное восстановление крепости раствора. Если с каждой секундой работы ванны вес коробки *K* будет увеличиваться на 1,1183 мг, значит, через ванну идет ток в 1 ампер.

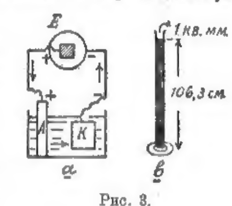


Рис. 3.

В некоторых случаях, например, в технике слабых токов (телефонии, телеграфии, пожарной сигнализации), силы токов так незначительны, что для измерения их берется единица в 1000 раз меньше ампера, называемая *миллиампером*. Тогда так и говорят: по цепи идет ток в один миллиампер.

Примеры. Металлическая лампа накаливания в 16 свечей

при напряжении 110 вольт потребляет около 0,18 ампера, такая же угольная лампа — 0,5 ампера. Телеграфные аппараты Морзе работают при силе тока в 0,2 ампера; проходящий через микрофон телефонного аппарата ток достигает 30 миллиампер. В проводах пожарной сигнализации мы имеем ток в 40 и более миллиампер. Электрический звонок домашней звонковой установки действует при силе тока, примерно, в 50 миллиампер.

К сказанному еще добавим, что количество электричества, проходящее при силе тока в 1 ампер по проводнику в одну секунду, называется 1 *амперсекундой*; оно носит особое название 1 *кулон*. О том, как пользуются на практике химическим действием тока, говорится в § 53 настоящей книги.

Для измерения сопротивления установлена единица в 1 *ом* (Ω, ω), равный сопротивлению столба ртути (рис. 3*b*) высотою в 106,3 см, сечением в 1 кв. миллиметр, при температуре $t = 0°$ C. В некоторых случаях эта единица оказывается слишком малой или, наоборот, большой. Тогда применяются: *мегом*, равный миллиону ом, *микром*, равный одной миллионной ома.

П р и м е р ы. Угольная лампа в 16 свечей, работающая при напряжении 110 вольт, имеет сопротивление в 220 ом, такая же металлическая лампа — около 610 ом. Сопротивление катушек электромагнита аппарата Морзе составляет 600 ом, сопротивление простого электрического звонка 10 — 20 ом, сопротивление микрофонов, когда по ним не проходит ток, 30 ом и 100 — 200 ом (при питании от центральной батареи, установленной на телефонной станции). Сопротивление изоляции в квартирных осветительных установках при напряжении сети в 110 вольт составляет не менее 110 000 ом, сопротивление изоляции высоковольтных устройств измеряется уже мегомами. Данные по внутреннему сопротивлению отдельных источников тока приведены в таблице 1 на стр. 18 и 19.

По закону Ома имеем: $E = IR$. Если в этой формуле $I = 1$ и $R = 1$, то $E = 1 \cdot 1 = 1$. Исходя из этого, можно сказать, что за единицу напряжения, называемую *вольтом*, принимают такое напряжение, которое должно быть, чтобы ток силою в 1 ампер проходил по проводу с сопротивлением в 1 ом. Если вольт для измерения оказывается слишком крупной величиной, можно измерять напряжение *милливольтами*, помня, что 1 вольт равен 1000 милливольтам. Тогда, например, вместо 10 тысячных вольта говорят: 10 милливольт. Для крупных измерений пользуются часто *киловольтами*, при чем 1 киловольт равен 1000 вольтам.

П р и м е р ы. В стационарных, т. е. непереносных, неподвижных осветительных установках наиболее распространено напряжение в 110 — 120 и 220 вольт, освещение железнодорожных

вагонов устраивается на 37 и 50 вольт, освещение в автомобилях — чаще всего на 6 и 12 вольт. Батарея карманного электрического фонарика имеет напряжение 4,5 вольта. Магнитоэлектрические машины, на практике называемые индукторами, дают напряжение в 45—50 и более вольт. Устройства для гальванопластики, применяемой для покрытия предметов тонким слоем осаждающегося на них металла, весьма часто работают при напряжении 1 — 6 вольт. Зажигание в автомобильных и авиационных двигателях внутреннего сгорания производится при помощи электрического искрового разряда напряжением в 12 000 — 15 000 и более вольт. Наиболее высокое напряжение имеют на практике линии передачи энергии, на которых мы имеем максимальные величины: 100 киловольт (100 000 вольт) — в СССР, 220 и даже 380 киловольт — за границей. Специальные лабораторные испытательные установки имеют еще более высокое напряжение, иногда превышающее миллион вольт (1000 киловольт). И на ряду с этим термопары (см. § 57), применяемые в электрических пирометрах (приборах для измерения высоких температур), дают напряжение не более 45 милливольт.

a b

Рис. 4.

В наших определениях трех основных электрических единиц электродвижущая сила получена в качестве третьей величины. Следует иметь в виду, что наука берет э.д.с. за исходную величину, устанавливая для ее измерения единицу, основываясь на способности проводника развивать электродвижущую силу в случае пересечения его с силовыми линиями магнитного поля (см. § 29). За абсолютную единицу э.д.с. (в системе *CGS*) принимается в науке такая э.д.с., которая возникает в проводнике, движущемся в магнитном поле перпендикулярно последнему со скоростью 1 см/сек. и пересекающемся с 1 силовой линией. При этом 1 вольт равен 10^8 (т. е. 100 000 000) единиц (*CGS*). На рис. 4*a* мы имеем проводник, движущийся в магнитном поле $N - S$, возникающем при наличии полюсов магнита. Если при своем движении проводник остается перпендикулярным силовым линиям и если каждый сантиметр проводника, например участок *АБ*, за одну секунду пересекает одну силовую линию,

то возникающую в нем электродвижущую силу условились считать равной одной абсолютной единице или одной стомиллионной вольта (см. § 32). Следующей величиной берется сила тока, которая определяется по ее динамическому действию. Абсолютную единицу имеет ток, который, протекая в проводнике в 1 см, в поле, напряжением в единицу, развивает силу в 1 дину. Практически мы можем себе представить, например, кольцо радиуса в 1 см (рис. 4*b*), в центре которого помещена единица магнетизма. Ток, проходя по этому кольцу на протяжении дуги AB, длиною 1 см, действует на единицу магнетизма с силою одной дины $\left(\frac{1}{981}\ г\right)$.[1] И уже отсюда:

$$1\ \text{ампер} = \frac{1}{10}\ (CGS) = 10^{-1}\ (CGS). \qquad (3)$$

Таким образом число ампер всегда в 10 раз больше числа абсолютных единиц. Установив так единицу для измерения силы тока по его динамическому действию, мы можем затем определить, какое электрохимическое действие оказывает сила тока в один ампер, например, в ванне с раствором азотносеребряной соли. Выше уже было указано, что такая сила тока за одну секунду выделит из раствора 1,1183 мг чистого серебра. Отсюда должно быть понятно, почему эта цифра берется не округленной (1 мг). Она получается сама собой, как следствие первоначального установления единицы по динамическому действию тока. Третья единица, ом, определяется из двух других величин. За абсолютную единицу сопротивления принимают такое сопротивление, по которому идет ток в 1 абсолютную единицу при э.д.с. также в 1 абсолютную единицу. Так как $R = \frac{E}{I}$, то

$$\text{ом} = \frac{\text{вольт}}{\text{ампер}} = \frac{10^8\ \text{абс. ед.}}{{}^1/_{10}\ \text{абс. ед.}} = 10^9\ \text{абс. единиц сопротивления.}$$

Выявляя какой столбик ртути при сечении в 1 мм² даст величину сопротивления в 1 ом, мы получим высоту этого столба равной, как было указано выше, 106,3 см. Следовательно, и в этом случае, как и при определении единицы силы тока по электрохимическому действию, цифра получается сама собой, как зависимая, не округленная (например, 1 м или 100 см), и изменена быть не может.

Из сказанного видно, что первый путь определения единиц для практики более удобен, почему им часто и пользуются.

[1] Динамические действия тока используются в электродвигателях (см. §§ 44 и 48), в измерительных приборах (§ 63) и т. д.

Напомним, что системой единиц CGS называется такая, в которой за основные меры приняты сантиметр (C), грамм (G) и секунда (S).

Три основных практических единицы получили свое название от трех великих ученых: *Ом* — знаменитый немецкий физик и математик (1787—1854 г.), *Ампер* — знаменитый французский физик (1775—1836 г.) и *Вольта* — знаменитый итальянский физик (1745—1827 г.). Все они много внесли в область изучения электричества. Амперу принадлежат важные исследования в области электродинамики. Вольта изобрел электрофор, электроскоп, конденсатор, исследовал явления гальванического тока и устроил первый электрохимический элемент — вольтов столб, который вместе с тем можно рассматривать, как первый сухой элемент. И, наконец, Ому принадлежит закон, изложенный в настоящем параграфе. Закон Ома есть основной закон электротехники, и без твердого его знания уяснение различных электрических явлений совершенно немыслимо.

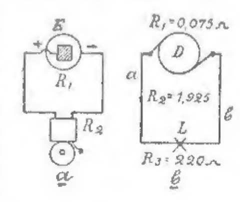


Рис. 5.

Согласно закону Ома, $E = IR$ или, иначе говоря, э.д.с. расходуется на преодоление всех сопротивлений цепи R при прохождении по ним тока I. Разделим теперь это сопротивление на составные части, а для этого представим себе цепь (рис. 5 *a*) с гальваническим элементом, которого внутреннее сопротивление равно R_1 и э.д.с. E. Если сопротивление внешней цепи R_2, то общее сопротивление $R = R_1 + R_2$. По закону Ома имеем:

$$E = IR \ \text{или}\ E = I(R_1 + R_2) = IR_1 + IR_2. \qquad (4)$$

Первая половина второй части (IR_1) составляет потерю напряжения внутри элемента, а вторая половина (IR_2) — потерю напряжения во внешней цепи или, как говорится, напряжение во внешней цепи у зажимов. Эта формула является дополнительным разъяснением к указанному в § 4 об э.д.с. и напряжении у зажимов. Задачи § 6 послужат иллюстрацией к сказанному.

§ 6. Задачи.

1. Э.д.с. элемента Лекланше $E = 1,4$ вольта. Элемент действует в цепи, полное сопротивление которой $R = 28$ ом. Какова в цепи сила тока I? Находим по закону Ома (1):

$$I = \frac{E}{R} = \frac{1,4}{28} = 0,05\ \text{A}.$$

Буква A — сокращенное обозначение ампера.

2. Динамомашина постоянного тока при сопротивлении цепи в 12 ом дает ток в 10 ампер. Какова э.д.с. машины?

Так как $R = 12$ и $I = 10$, то, по формуле (2), э. д. с. $E = IR = 10 \cdot 12 = 120$ V.

3. Э.д.с. динамомашины $E = 115$ вольт. Машина дает ток силою $I = 100$ ампер. Определить сопротивление цепи. По формуле (3):

$$R = \frac{E}{I} = \frac{115}{100} = 1{,}15\ \Omega.$$

Буква Ω — сокращенное обозначение Ома.

4. Какова э.д.с. элемента, если при потере напряжения на внутреннее сопротивление в 0,2 вольта, он дает, напряжение у зажимов внешней цепи 1,2 вольта?

Искомая э.д.с., согласно формуле (4), будет равна сумме указанных величин:

$$E = 0{,}2 + 1{,}2 = 1{,}4\ \text{V}.$$

Буква V — сокращенное обозначение вольта.

5. Потеря напряжения внутри элемента $E_1 = 0{,}2$ вольта при силе тока $I = 0{,}04$ ампера. Каково внутреннее сопротивление элемента?

Согласно формуле (4) имеем $E_1 = IR_1$ и, следовательно,

$$R_1 = \frac{E_1}{I} = \frac{0{,}2}{0{,}04} = 5\ \Omega.$$

6. Э.д.с. машины $E = 115$ вольт, потеря напряжения в самой машине составляет 3 вольта. Каково напряжение у зажимов внешней цепи и сопротивление последней, если машина дает ток силой в 100 ампер?

$$E_2 = E - E_1 = 115 - 3 = 112\ \text{V},\ R_2 = \frac{E_2}{I} = \frac{112}{100} = 1{,}12\ \Omega.$$

7. Сопротивление элемента $R_1 = 0{,}48$ ома, сопротивление внешней цепи $R_2 = 19{,}52$ ома. Определить э.д.с. элемента, потерю во внутренней и внешней цепи при силе тока в 0,075 ампера.

$$E = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2) = 0{,}075 \cdot (0{,}48 + 19{,}52) = 0{,}075 \cdot 20 = 1{,}5\ \text{V}.$$

Потеря напряжения в элементе $E_1 = IR_1 = 0{,}075 \cdot 0{,}48 = 0{,}036$ V.

Потерю напряжения во внешней цепи или напряжение у зажимов элемента можно найти двояко:

1) $E_2 = E - E_1 = 1{,}5 - 0{,}036 = 1{,}464$ V.
2) $E_2 = IR_2 = 0{,}075 \cdot 19{,}52 = 1{,}464$ V.

8. Угольная 16-свечная 110-вольтовая лампочка расходует ток силою в 0,5 ампера. Определить сопротивление лампы.

$$R = \frac{E}{I} = \frac{110}{0{,}5} = 220\ \Omega.$$

9. Металлическая (нить из вольфрама) 16-свечная 110-вольтовая лампочка расходует ток силою в 0,18 ампера. Определить сопротивление лампы.

$$R = 110 : 0{,}18 = 611\ \Omega.$$

10. Катушка из изолированной проволоки при напряжении в 20 вольт пропускает ток в 2,5 ампера. Каково ее сопротивление?

$$R = 20 : 2{,}5 = 8\ \Omega.$$

11. В сети напряжением в 110 вольт сопротивление изоляции между проводами составляет 220 000 ом. Определить величину утекающего через изоляцию тока.

Согласно закону Ома от одного провода к другому через их взаимную изоляцию пойдет ток:

$$I = \frac{110}{220\,000} = 0{,}0005\ \text{A} = 0{,}5\ \text{mA}.$$

Буквы mA — сокращенное обозначение миллиампера.

§ 7. Сопротивления цепи.

Как уже говорилось выше, э.д.с. источника электрической энергии расходуется на преодоление сопротивлений при прохождении по ним тока определенной силы. Это сопротивление мы разделили на внутреннее, или самого источника тока, и внешнее, к которому прежде всего принадлежит приемник. Внешнее сопротивление в свою очередь может быть разделено на сопротивление полезное и вредное. Источник тока обычно бывает связан с приемником электрической энергии при помощи проводов, составляющих таким образом часть внешней цепи. Устройства, в которых эти провода отсутствуют, представляют исключения, к числу которых можно отнести переносные электрические фонари и лампы шахтеров. И так как провода тоже представляют собой сопротивление электрическому току, то и в них должна иметь место потеря напряжения. Если обозначим сопротивление источника тока через R_1, сопротивление проводов через R_2 и сопротивление приемника энергии через R_3, то закон Ома можно будет написать так:

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + R_3}$$

или

$$E = IR_1 + IR_2 + IR_3, \qquad (5)$$

где произведения второй части дадут потери напряжения в соответствующих частях цепи, т. е. в самом источнике, в проводах и в приемнике.

В задачах 8 и 9 § 6 рассматриваются две лампы, угольная и металлическая, на одинаковую силу света и одинаковое напряжение. Металлическая лампа накаливания, имея большое сопротивление, потребляет ток меньшей силы, и дает в некотором определенном направлении те же 16 свечей. Ясно, что большее, сравнительно с угольной, сопротивление металлической лампы,

дающей такой же световой эффект, является выгодным. Работа электрического тока затрачивается здесь на *полезную* работу. И наоборот, — ни в коем случае нельзя допустить, чтобы в *проводах*, передающих ток, имели место большие потери. Если, например, во внешней цепи расходуется 220 вольт и из них лишь 110 на лампу и столько же на провода, то вышло бы, что на 50% данная установка работала бы на провода. В таком случае она была бы невыгодна. На самом деле электрические провода рассчитываются так, чтобы потеря напряжения в них составляла небольшой процент от общего напряжения внешней цепи. Например, в электрической цепи, представленной на рис. 5b (стр. 15) имеем динамомашину D с сопротивлением $R_1 = 0{,}075$ ома, провода a и b с общим сопротивлением $R_2 = 1{,}925$ ома и приемник-лампу L с сопротивлением $R_3 = 220$ ом. При силе тока $I = 0{,}5$ ампер по формуле (5) имеем:

$$E = 0{,}5 \cdot 0{,}075 + 0{,}5 \cdot 1{,}925 + 0{,}05 \cdot 220 = \\ = 0{,}0375 + 0{,}9625 + 110 = 111 \text{ V}.$$

Вычисления показывают, что в машине и в проводах теряется небольшая доля э.д.с.: всего 1 вольт из 111.

Чтобы наибольшая часть напряжения досталась на долю приемников энергии, сопротивление источника тока и проводов берут незначительным. Вопрос о проводах будет разобран отдельно в § 12—14. Ниже мы приводим таблицу с цифровыми данными для различных источников тока.

Таблица I.

А. Гальванические элементы.

Наименование элементов	Э.д.с. (вольты)	Внутр. сопротивление (омы)
Лекланше квадратный	1,4	5
» мешковый (Сименса)	1,4	0,06—0,09
» сухой (Геллезена)	1,5	0,08—0,1
Мейдингера новый	1,18	5—6
» старый	1,18	6—10
Даниэля	1,1	0,5
Грове	1,7—2,0	0,15
Бунзена	1,8—1,9	0,2
Лаланда и Шаперона	0,7—0,9	0,05
Эдисон-Лаланда	0,7	0,03

Б. Динамомашины постоянного тока.

Нормальная сила тока I (амперы)	Э.д.с. E (вольты)	Сопротивление R (омы)	Потеря напряжения в машине при токе I	Потеря в процентах от э.д.с.
42	100	0,139	5,85	5,8
41	110	0,206	8,45	7,7
144	125	0,0338	4,9	3,9
144	230	0,107	16,0	6,9
120	460	0,00565	2,75	0,6
300	550	0,081	24,2	4,8
910	550	0,0181	16,7	3,0
66	2000	0,47	31,0	1,5
150	2250	0,24	36,0	1,6

Таблица показывает, что лучшие типы элементов (Лекланше, мешковый и сухой, и другие), а также и электрические машины имеют малое сопротивление, и потому потеря напряжения в них не может быть большой.

§ 8. Задачи.

1. Э.д.с. машины $E = 120$ вольт, внутреннее ее сопротивление $R_1 = 0{,}2$ ома. Найти потерю напряжения в машине и напряжение у ее зажимов, если во внешнюю цепь идет ток в 40 ампер.

Потеря напряжения в машине $E_1 = 40 \cdot 0{,}2 = 8$ V.

Напряжение у зажимов машины, расходуемое на внешнюю цепь $E_2 = 120 - 8 = 112$ V.

2. Машина с внутренним сопротивлением $R_1 = 0{,}15$ ома при токе в 120 ампер дает напряжение у зажимов 550 вольт. Определить э.д.с. машины.

Потеря напряжения в машине $E_1 = 120 \cdot 0{,}15 = 18$ V.

Э.д.с. $E = 550 + 18 = 568$ V.

3. Машина с э.д.с. $E = 230{,}7$ вольта дает во внешнюю цепь ток $I = 100$ ампер при напряжении у зажимов 220 вольт. Определить потерю напряжения в машине и ее сопротивление.

Потеря напряжения в машине $D_1 = 230{,}7 - 220 = 10{,}7$ V.

Сопротивление машины, согласно закону Ома:

$$R_1 = \frac{E_1}{I} = \frac{10{,}7}{100} = 0{,}107\ \Omega.$$

4. Потеря напряжения в проводах составляет 5 вольт при силе тока в 10 ампер. Найти сопротивление провода.

По закону Ома сопротивление провода $R = \frac{5}{10} = 0,5\ \Omega$

5. Определить потерю напряжения в проводе при прохождении по нему тока в 50 ампер, если сопротивление провода 0,3 ома.

Искомая потеря напряжения $e = 50 \cdot 0,3 = 15$ V.

§ 9. Земля как проводник. Блуждающие токи. Короткое замыкание.

Представленные на рис. 2, 3 и 5 установки для передачи энергии имеют прямой и обратный провод. Такой же случай

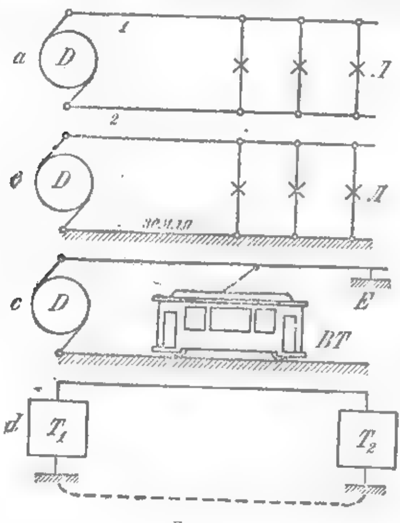


Рис. 6.

представлен на рис. 6*a*, где мы имеем динамомашину *D*, проводами *1* и *2* соединенную с лампами *L*. Если один из полюсов машины заземлить и все лампы с одной стороны также соединить с землею, то мы получим однопроводную сеть, как это и показано на рис. 6*b*. Такую сеть еще недавно можно было встре-

тить в отдельных установках, например, на некоторых заводах, на судах. Такая проводка и в настоящее время применяется в трамваях (рис. 6*c*), электрических железных дорогах, в наиболее простых телефонных устройствах (рис. 6*d*) и в значительной части автомобильных установок. Достоинство такой проводки заключается в ее простоте и сравнительной дешевизне. Однако, если единственный провод установки получит заземление (соединится с землей), как это для примера показано в точке *E* на рис. 6*e*, то установка выйдет из строя, и подачу тока можно будет возобновить лишь по устранении этого заземления. При

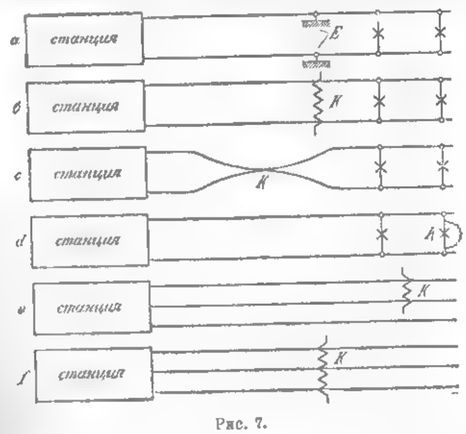


Рис. 7.

[illegible]проводной же системе и вообще в системах, в которых [illegible] обратный провод не использован, заземление одного [illegible] провода весьма часто не нарушает работы установки, [illegible] конечно, наличие такого заземления не исключает необходимости [illegible] места повреждения и устранения последнего.

[illegible] установках связи (телефония, телеграфия, сигнализация и т. д.) использование земли в качестве второго провода не [illegible] никаких осложнений. В установках сильных токов, [illegible] токи, проходящие по земле, достигают значительной силы, [illegible] имеет место в городских трамваях и эл. ж. д., прини[illegible] меры к тому, чтобы они в пределах населенных пунктов

[illegible] уложен[illegible] ного в земле. Токи, проходящие непосредственно по земле, [illegible] [illegible] *блуждающими токами*. [illegible] трубы, металлические оболочки кабелей и т. п. Следовательно, в пределах населенных пунктов эти блуждающие токи должны быть [illegible] можно слабее.

Если единственный провод однопроводной линии получит соединение с землей, при чем величина сопротивления этого соединения будет весьма незначительна, то говорят, что провод получил «короткое замыкание». При таком замыкании по линии пойдет ток силы, значительно превышающей нормальную, и линия будет выключена тем, что сгорят поставленные на ней предохранители или выключатся автоматические выключатели.

Рис. 8.

Причины возникновения короткого замыкания могут быть весьма различны. Несколько случаев, встречающихся на практике коротких замыканий, представлено на рис. 7, на котором мы видим:

a — короткое замыкание, получившееся вследствие заземления линейных проводов в пункте E;

b — короткое замыкание вследствие падения на голые линейные провода голого проводника K;

c — короткое замыкание вследствие соединения двух голых (или оголенных) проводов линии в точке K;

d — короткое замыкание в ламповом патроне K;

e — короткое замыкание двух проводов трехпроводной линии в точке K;

f — короткое замыкание трех проводов трехпроводной сети в пункте K.

Короткие замыкания часто бывают причиной перерывов в электроснабжении. Необходимо поэтому иметь постоянное наблюдение за состоянием электротехнических устройств и принимать своевременные меры к приведению их в исправное состояние.

Короткое замыкание получается иногда при монтаже установок неопытным персоналом. В качестве иллюстрации к сказанному рассмотрим схему, представленную на рис. 8. В цепи I лампы $Л_1$ последняя присоединена к сети правильно, и ток в этой цепи проходит последовательно через выключатель B_1 и самую лампу. В цепи II лампы $Л_2$ последняя присоединена не[illegible] [illegible] B_2 [illegible] $Л_2$ [illegible] короткое замыкание.

§ 10. Задачи

1. [illegible] машины E 110 вольт, ее внутреннее сопротивление [illegible]. При соединении неопытным установщиком она оказалась [illegible] проводником с сопротивлением $R_2 = 0{,}04$ ома. [illegible] наибольшую силу тока короткого замыкания.

$$I = \frac{110}{0{,}16 + 0{,}04} = \frac{110}{0{,}2} = 550 \text{ A.}$$

2. [illegible] делить силу тока для машины предыдущей задачи, если короткое замыкание произошло в конце линии, сопротивление которой со[illegible] 0,84 ома.

[illegible] Ома

$$I = \frac{110}{0{,}16 + 0{,}84} = \frac{110}{1} = 110 \text{ A.}$$

3. Динамомашина имеет внутреннее сопротивление $R_1 = 0{,}2$ ома и работает на внешнюю цепь при напряжении $E_2 = 120$ вольт и при силе тока в 50 ампер. Найти силу тока короткого замыкания, если машина замкнута на короткое в начале линии, то есть при выводе проводов со [illegible] (рис. 7*b*), и сопротивление проводов от машины до места замыкания 0,06 ома.

Потеря напряжения в машине $E_1 = 50 \cdot 0{,}2 = 10$ V.

Э. д. с. машины $E = 120 + 10 = 130$ V.

Сила тока короткого замыкания:

$$I = \frac{130}{0{,}2 + 0{,}06} = 500 \text{ A.}$$

§ 11. Вопросы для повторения.

1. Что такое электричество? Как получают электрическую энергию?
2. Каковы основные элементы электрических устройств и каково их назначение? Приведите примеры установок, включающих основные элементы устройств. Нарисуйте схему.
3. Какая разница между электродвижущей силой и напряжением у зажимов источника тока?
4. Какие величины входят в закон Ома и чем они измеряются? Какие производные от этих величин?
5. Какие сопротивления входят в состав электрической цепи? Почему сопротивления источника электрической энергии и проводов делают незначительными?
6. Каковы особенности установок, использующих землю, как обратный провод? Что такое блуждающие токи?
7. Что такое короткое замыкание?
8. Придумайте несколько задач на закон Ома.

§ 12. Формулы для расчета сопротивлений проводников

Из практики известно, что электрические провода для сильных токов (установки для освещения, электродвигателей и пр.) обычно изготовляются из меди и реже из алюминия или железа, и слабых же токах (телефония, телеграфия и пр.) чаще всего находит применение железная и бронзовая проволока. Выбор соответствующего материала обусловливается большей или меньшей электрической проводимостью металлов. Потеря напряжения в проводах прямо пропорциональна сопротивлению проводов, т. е. во сколько раз возрастет сопротивление, во столько раз увеличится потеря напряжения (см. задачу 5 § 8), а сопротивление в свою очередь зависит от *вещества* проводника, его *длины* и *поперечного сечения*.

Электрическое сопротивление проводников в зависимости от материала, из которого они изготовляются, характеризуется на практике *удельным сопротивлением*, представляющим собою сопротивление проводника длиною в 1 м при поперечном сечении в 1 кв. мм. Это удельное сопротивление обозначается греческой буквой ρ (ро), длина — буквой l и поперечное сечение — буквой q. Чем сопротивление проводника *меньше*, тем он лучше проводит электричество, другими словами — тем больше его проводимость. Если возьмем дробь $\frac{1}{\rho}$, то получим так называемую удельную проводимость, т. е. величину, обратную удельному сопротивлению.[1] В таблице II даны удельные сопротивления и проводимости для различных металлов при длине в 1 м и поперечном сечении в 1 кв. мм при температуре в 15° С.

Таблица II показывает, что в приведенном ряде металлов лучшим проводником является серебро, так как его удельное сопротивление наименьшее, а удельная проводимость — наибольшая. Но оно дорого, менее прочно и тяжелее, например, меди. Сталь, наоборот, прочна, но ее удельное сопротивление велико. Медь же, как обладающая сравнительно небольшим удельным сопротивлением и в то же время относительно невысокой стоимостью, является наиболее подходящим материалом для проводов.

Проводимость алюминия составляет:

$$\frac{35}{57}\cdot 100 = 61,4\% \text{ проводимости меди,}$$

[1] Единица для измерения проводимости — *мо* (получаемая чтением слова *ом* справа налево) — применяется весьма редко.

Таблица II.

Металлы	Сопротивление ρ	Проводимость $\frac{1}{\rho}$	Удельный вес
Серебро	0,0159	63	10,5
Медь	0,0175	57	8,91
Золото	0,0220	45	19,3
Алюминий	0,0287	35	2,7
Вольфрам	0,0560	18	18,7
Цинк	0,0590	17	7,1
Платина	0,0937	11	21,2
Никель	0,1306	7,6	8,9
Железо	0,1324	7,5	7,8
Олово	0,1420	7	7,3
Сталь	0,1843	5,5	7,6
Свинец	0,2076	4,8	11,4
Чугун кремнистый	0,5200	1,92	7,25
Ртуть	0,9430	1,06	13,6

проводимость железа:

$$\frac{7,5}{57}\cdot 100 = 13,2\% \text{ проводимости меди.}$$

Бронза, представляющая собою сплав меди с оловом (с примесью цинка, свинца, алюминия или других составных частей), а также бронза фосфористая, кремнистая, хромистая и т. д., имеет, смотря по своему составу, проводимость, равную 97 — 30% проводимости меди.

Стремление соединить высокую проводимость меди с прочностью стали вызвало к жизни так называемые биметаллические провода, представляющие собою соединение проводов, изготовленных из этих двух металлов. Так в Америке в технике слабых токов нашли применение стальные провода с медной оболочкой (панцырные провода). Переход через р. Неву в ее верховьях выполнен Электротоком для линии высокого напряжения биметаллическим проводом, состоящим из центральной медной жилы сечением 70 кв. мм и навитых на нее девяти прядей из стальных про-

волок. Медная жила свита из 19 луженых проволок отожж[illegible] мягкой меди. Каждая из 9 стальных прядей свита также из [illegible] оцинкованных проволок тигельной стали, диаметром 1,0[illegible] Наружный диаметр биметаллического провода составляет [illegible]

Имеются предложения применять медно-кадмиевые провода, которые по прочности близки к бронзовым проводам, а по проводимости мало отличаются от меди, если кадмия прибавлено к меди около 1%. В Америке и реже в Германии нашли применение биметаллические провода из стали и алюминия. В этом случае берут прочный стальной сердечник из оцинкованных [illegible] тых стальных проволок. Вокруг него навивают, по большей части в два слоя, алюминиевый многожильный провод. Стальной провод и в этом случае воспринимает главным образом механическую нагрузку, а алюминиевый покров служит главным образом как электрический проводник.

Провода изготовляются обычно только определенных (стандартизованных) сечений в 1, 1,5, 2,5, 4, 6, 10, 16, 25, 35, 50, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 310, 400, 500, 625, 800 и 1000 кв мм.

Возьмем медную проволоку длиною $l = 100$ м и поперечным сечением $q = 10$ кв. мм. Так как удельное сопротивление меди или сопротивление медной проволоки длиною 1 м и поперечным сечением в 1 кв. мм $\rho = 0{,}0175$, то сопротивление нашего провода R при длине в 100 м должно быть в 100 раз больше и при сечении в 10 кв. мм в 10 раз меньше. Таким образом сопротивление проволоки будет:

$$R = \frac{0{,}0175 \cdot 100}{10} = 0{,}175\ \Omega.$$

Подставляя вместо цифр буквы, получим формулу для расчета сопротивлений проводов по заданным — материалу, длине и сечению:

$$R = \rho \frac{l}{q}. \qquad (6)$$

Из физики известно, что с изменением температуры меняются и физические свойства металлов. Так от нагревания они удлиняются, их упругость уменьшается. Вместе с тем и электрические их свойства не остаются без изменения: сопротивление их увеличивается, а проводимость уменьшается. Поэтому данные таблицы II будут правильны только для одной определенной температуры, а именно 15° С. Сопротивление медного провода в 1 ом при нагревании на 1° С увеличивается на $a = 0{,}0038$ ома. Поэтому, меняя его температуру на 1°, на 2°, на 3°, на 10° и

[illegible] соответственно получим новые величины сопротивления [illegible]

$$1 + 0{,}0038 \cdot 1; \quad 1 + 0{,}0038 \cdot 3;$$
$$1 + 0{,}0038 \cdot 2; \quad 1 + 0{,}0038 \cdot 10;$$
$$1 + 0{,}0038 \cdot t \text{ или } 1 + at$$

[illegible] величину 0,0038 обозначим буквой a и возьмем проводник [illegible] не в 1 ом, а в 20 или R_1 ом, то результаты [illegible] будут больше в 20 или R_1 раз:

$$R_t = 20 \cdot (1 + 0{,}0038\,t) \text{ или } R_2 = R_1\,(1 + at). \qquad (7)$$

[illegible] выражение дает нам формулу для вычисления [illegible] проводников при любой температуре. Коэффициент [illegible] для меди равный 0,0038 — для других металлов будет [illegible] другие значения, как это видно из таблицы III. Следует

Таблица III.

Металлы	Температурный коэффициент a
Серебро	0,00377
Медь	0,00380
Золото	0,00365
Алюминий	0,00388
Вольфрам	0,00464
Цинк прессованный	0,00365
Платина прокаленная	0,00243
Никель	0,00621
Железо	0,00480
Олово	0,00335
Свинец	0,00387
Ртуть	0,00091

заметить, что в последней формуле (7) знак плюс будет правилен не для всех проводников. Сопротивление угольной нити, например, при прохождении по ней тока или при нагревании, уменьшается, почему перед температурным коэффициентом угля ставится знак минус. В § 6 задачи 8 и 9 дали нам величины сопротивлений угольной и металлической 16-свечных ламп накаливания при их горении (в горячем состоянии). Если бы мы

измерили сопр тивление этих ламп в холодном состоянии (пропуская слабый ток и измеряя их напряжение), то получили бы следующие сравнительные данные:

	В т[illegible] сос[illegible]	В [illegible] сос[illegible]
Угольная 16-св. 110-вольтовая лампа .	220 Ω	420 Ω
Металлич. 16-св. 110 » » .	611 »	[illegible]

Вследствие такой разницы в электрических свойствах металла (вольфрама) и угля, при зажигании ламп получаются различные, заметные простым глазом результаты. В металлической лампе, обладающей в холодном состоянии малым сопротивлением, сразу проходит сильный ток, *сразу* ярко накаливается нить, и поэтому ток быстро доходит до нормы. Угольная лампа, имея в холодном состоянии большое сопротивление (приблизительно в 2 раза больше того, которое она имеет при горении), при включении пропускает ток тоже в 2 раза меньше нормы, почему и не получает сразу полного накала. При нагревании от тока сопротивление угольной нити лишь постепенно *уменьшается* до нормы, вместе с тем *постепенно* увеличиваются до нормы потребляемый ток и накал.

Приведенная в настоящем параграфе таблица II дает величины удельных сопротивлений различных металлических проводников. Далее, в таблице VI, приведены удельные сопротивления различных сплавов, которые обладают значительно большим сопротивлением, чем входящие в состав их металлы. Еще большим сопротивлением обладают уголь и растворы, как это и видно из таблицы IV.

Таблица IV.

Материал	Удельное [illegible]противление
Уголь	100—1000
Уголь для дуговых ламп:	
однородный	[illegible]
с сердцевиной	57—88
Угольные волоски для ламп накаливания	[illegible]0—40
Раствор серной кислоты (25°/₀)	14 000
Вода при 22°	718 000

§ 13. Задачи.

1. Определить сопротивление медной, алюминиевой и железной про[illegible] при одинаковой их длине $l = 100$ м и поперечном сечении $q =$ [illegible] кв. мм. Удельное сопротивление взять из таблицы II.

По формуле (6) имеем:

[illegible]

$$R_1 = \frac{0{,}0175 \cdot 100}{25} = 0{,}07\ \Omega.$$

[illegible]

$$R_2 = \frac{0{,}0287 \cdot 100}{25} = 0{,}1148\ \Omega;$$

[illegible]

$$R_3 = \frac{0{,}1324 \cdot 100}{25} = 0{,}5296\ \Omega.$$

2. Изолированная медная проволока свернута в бухту. Требуется [illegible] ее длину, не развертывая ее, если известно, что сечение проволоки 16 кв. мм и сопротивление всей бухты $R = 0{,}21875\ \Omega$.

На основании формулы (6) имеем:

$$l = \frac{Rq}{\rho} = \frac{0{,}21875 \cdot 16}{0{,}0175} = 2[illegible]0 \text{ м}.$$

3. Какого сечения должна быть медная проволока, если при длине 150 м она имеет сопротивление $R = 0{,}105$ ома.

По формуле (6) имеем.

$$q = \frac{\rho l}{R} = \frac{0{,}01[illegible]5 \cdot 150}{0{,}105} = 25 \text{ кв. мм}.$$

4. Определить, из какого материала изготовлена проволока, если при длине 300 м и сечении в 70 кв. мм она имеет сопротивление $R =$ 0,123 ома.

По формуле (6) находим удельное сопротивление проволоки.

$$\rho = \frac{qR}{l} = \frac{70 \cdot 0{,}123}{300} = 0{,}[illegible]287$$

По таблице II определяем, что материалом для изготовления проволоки послужил алюминий.

5. При температуре $t_1 = 15°$ C сопротивление медной проволоки $R_1 =$ 0,08 ома, найти ее сопротивление при $t_2 = 55°$ C.

Повышение температуры проволоки составляет $t_2 - t_1 = 55 - 15 =$ 40° C.

Ее сопротивление при температуре в 55° C находим по формуле (7):

$$R_2 = 0{,}08(1 + 0{,}0038 \cdot 40) = 0{,}09216\ \Omega.$$

6. Сопротивление железной проволоки при температуре $t_2 = 20°$ C равно 11 омам. Определить ее сопротивление при t_1 [illegible]° C. Имея в виду, что в последнем случае температура проволоки должна упасть на $t_2 - t_1 = 40°$ C, мы, пользуясь формулой (7), находим:

$$14 = R_1(1 + 0{,}0048 \cdot 40),$$

откуда

$$R_1 = \frac{14}{1 + 0{,}0048 \cdot 40} = 11{,}74\ \Omega.$$

7. Линия электропередачи от Волховской гидроэлектрической станции в Ленинград имеет протяжение 131 км и состоит из шести медных проводов, каждый сечением 120 кв. мм. Определить сопротивление каждого провода.

По формуле (6):

$$R = \frac{0{,}0175 \cdot 131000}{120} = 19{,}1\ \Omega.$$

8. Линия протяжением 100 м состоит из двух проводов сечением 4 кв. мм и в конце имеет нагрузку в 10 ампер. Определить падение напряжения в проводе.

Сопротивление проводов (медных):

$$R = \frac{0{,}0175 \cdot 100 \cdot 2}{4} = 0{,}875\ \Omega$$

Падение напряжения в проводах, по формуле (1)

$$e = IR = 10 \cdot 0{,}875 = 8{,}75\ V.$$

§ 14. Простейший расчет проводов.

При прохождении тока I по проводнику с сопротивлением R, согласно закону Ома, в нем происходит потеря напряжения $e = IR$. Если мы в этом выражении вместо R подставим его значение в зависимости от длины, удельного сопротивления и сечения [см. формула (6) § 9], то получим:

$$e = I\rho \frac{l}{q}, \qquad (8)$$

откуда

$$q = \rho \frac{Il}{e}.$$

При помощи этой формулы мы можем рассчитать сечение провода, если нам даны: l — длина провода в обоих направлениях, e — потеря напряжения в проводе и материал, из которого провод изготовлен (удельное сопротивление ρ). Беря из таблицы II числовое значение удельного сопротивления для меди, получим простейшие формулы для расчета медных проводов:

$$q = \frac{0{,}0175\, Il}{e}$$

или

$$q = \frac{Il}{57\,e}, \qquad (9)$$

$$0{,}0175 = \frac{1}{57}$$

[illegible] этой формулой считаются с той предельной [illegible], какая по существующим правилам допускается для [illegible], и сечениями имеющихся в продаже проводов. [illegible] таблица V показывает, например, что для провода [illegible] мм, проложенного в закрытом помещении, допустима сила тока максимум (самое большое) в 43 ампера.

Таблица V.

[illegible]	[illegible]	1	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150
[illegible]	9	11	14	20	25	31	43	75	100	125	160	200	240	280	325

Формула (9) является простейшей формулой для расчета проводов и применяется для самых простых случаев канализации [illegible] тока. Вообще же расчет сетей, особенно сетей [illegible] тока и линий электропередач, составляет сложную [illegible] задачу, требующую для своего решения приведения [illegible] расчетов.

§ 15. Задачи.

1. Найти сечение провода для линии длиною в 100 м (в один конец) [illegible] ток в 14 ампер при потере напряжения 4 вольта.

Для медного провода (длина прямого и обратного провода составит 200 м) имеем:

$$q = \frac{Il}{57e} = \frac{14 \cdot 2 \cdot 100}{57 \cdot 4} \approx 12{,}3\ \text{кв. мм.}$$

Знак $\approx$ обозначает приближенное не точное (с округлением) равенство.

Так как провода такого сечения не изготовляются, то надо остановиться или на 10 кв. мм или на 16 кв. мм. В первом случае потеря напряжения, определяемая из формулы (9), будет:

$$e = \frac{Il}{57q} = \frac{14 \cdot 2 \cdot 100}{57 \cdot 10} = 4{,}91\ V,$$

во втором случае:

$$e = \frac{14 \cdot 2 \cdot 100}{57 \cdot 16} = 3{,}07\ V.$$

2. Какого сечения должен быть провод для линии в 20 м [illegible] при токе в 60 ампер можно допустить падение напряжения в 4 вольта?

По формуле (9) находим:

$$q = \frac{60 \cdot 2 \cdot 20}{57 \cdot 4} \approx 10 \text{ кв. мм.}$$

Сечение это брать нельзя, так как по таблице V оно допускает нагрузку не свыше 43 ампер. Берем поэтому следующее большее сечение — 16 кв. мм.

3. Рассчитать алюминиевый провод для линии в 20 м [illegible] в 30 ампер и потере напряжения 5,74 вольта.

$$q = \frac{0{,}0287 \cdot 30 \cdot 2 \cdot 40}{5{,}74} = 6 \text{ кв. мм.}$$

4. Рассчитать сечение медного и алюминиевого провода для линии длиною в 76 м, передающей 12 ампер, если потеря напряжения должна составлять не более 4 вольт.

Для медного провода $q = \frac{12 \cdot 2 \cdot 76}{57 \cdot 4} = 8$ кв. мм. Берем 10 кв. мм.

Для алюминиевого провода $q = \frac{0{,}0287 \cdot 12 \cdot 2 \cdot 76}{4} = 13$ кв. мм. Берем 16 кв. мм.

5. Определить, во сколько раз больше надо брать сечение провода из алюминия в случае замены им медной проволоки.

Сечение q_1 алюминиевого провода нужно взять во столько раз больше медного q_2, во сколько раз удельное сопротивление алюминия больше удельного сопротивления меди. На основании сказанного пишем пропорцию:

$$q_1 : q_2 = 0{,}0287 : 0{,}0175,$$

откуда

$$q_1 = \frac{0{,}0287}{0{,}0175} q_2 \approx 1{,}6 q_2.$$

§ 16. Реостаты и магазины сопротивлений.

Нами уже выяснено как важно, чтобы сопротивления источников электрической энергии и проводов имели небольшую величину, так как только тогда потеря напряжения в них будет незначительна и наибольшая часть напряжения будет использована в приемниках. Но в отдельных случаях бывает необходимо иметь в цепи такие приборы или аппараты, которые, наоборот, представляя собою достаточное сопротивление, поглощали бы значительную часть напряжения. На рис. 9a представлена динамомашина D, дающая ток при напряжении $E = 120$ вольт и сопротивлении внешней цепи $R = 15$ ом. Пусть в этой цепи находится приемник K (например, кипятильник, электрическая печь и т. п.)

[illegible] на 6 ампер. Так как в нашей цепи при напряжении [illegible] согласно закону Ома, пойдет ток $I = 120 : 15 = 8$ [illegible] для уменьшения тока до потребной величины надо [illegible] сопротивление внешней цепи до $120 : 6 = 20$ ом; иначе [illegible] цепь надо прибавить сопротивление $20 - 15 = 5$ ом, [illegible] сделано на рис. 9b. При токе в 6 ампер в этом до[illegible] сопротивлении поглощается напряжение $e = 6 \cdot 5 = 30$ [illegible] специально, включаемые в цепь сопротивления, [illegible] уменьшения силы тока и, следовательно, для по[illegible] напряжения, называются *реостатами*. На [illegible] и 9d показан реостат с 5 контактами, при чем в пер[illegible] случае в этом реостате включены только две *секции* (части, [illegible] подразделено все сопротивление реостата), во вто[illegible] случае — весь реостат. Нетрудно догадаться, что когда [illegible] введен полностью, то сила тока в цепи будет наимень-

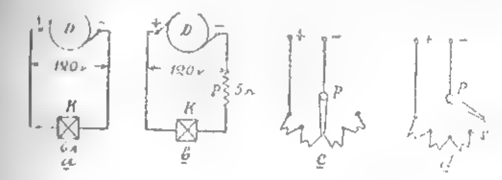


Рис. 9

шая. Переводя, следовательно, рукоятку P этого реостата, мы можем менять или регулировать силу тока, отчего данный реостат может быть назван *регулировочным*. Такого рода реостат мы имеем на рис. 10a, где он включен в цепь полюсов M динамомашины, якорь которой обозначен буквой D. Поворотом рукоятки реостата влево мы достигаем уменьшения тока в полюсах и вместе с тем уменьшения напряжения у зажимов машины; поворот вправо поведет к увеличению напряжения. В цепи электродвигателей реостаты применяются при пуске моторов в ход, не давая увеличиваться пусковому току выше определенной величины. Такой *пусковой* реостат имеем мы на рис. 10b. Положение *1* рукоятки P реостата соответствует спокойному состоянию мотора, положение *5* — его рабочему состоянию, когда реостат выведен, положения *2, 3, 4* — пусковые. Помимо пусковых реостатов, для двигателей применяются также и регулировочные реостаты, дающие возможность в известных пределах менять скорость вращения их (выше и ниже нормальной).

В соответствии с рис. 10a и рис. 11 показаны [illegible] ход [illegible] проволочного реостата [illegible] пускового реостата для [illegible] тока [illegible]

Так как удельное сопротивление применяемых [illegible] не очень большое, то изготовление таких проволочных [illegible] Проволоки [illegible] очень много, и [illegible] числа бы дорогим и громоздким [illegible] вычислим [illegible] медного провода сечением 1 кв. мм для реостата рис. 9b, [illegible] сопротивление которого 5 ом. Так как $R=\rho\frac{l}{q}$, то длина провода

$$l=\frac{Rq}{\rho}=\frac{R\cdot q}{\frac{1}{57}}=5\cdot 1\cdot 57=285 \text{ м}$$

Железной проволоки, удельное сопротивление которой [illegible] 0,1324 [illegible] 7,5 раза больше, пойдет при том же сечении [illegible]

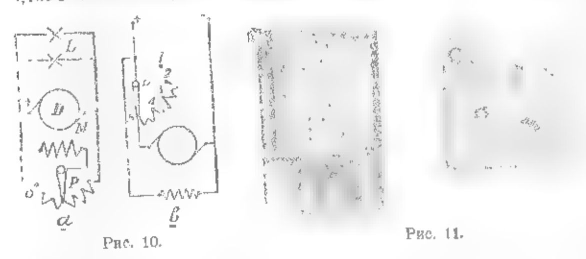


Рис. 10. Рис. 11.

7,5 раза меньше. Реостат и в этом случае все-таки будет громоздким. Что же говорить после этого про случаи, когда необходимо бывает иметь сопротивление, например, в 1000 ом и для токов большой силы? Для изготовления реостатов применяются поэтому, помимо железных проволок и специальных чугунных отливок, проволоки из сплавов, удельное сопротивление которых очень велико. В таблице VI приведены данные по сплавам высокого сопротивления. Из таблицы мы видим, что некоторые сплавы обладают к тому же температурным коэффициентом или незначительным, или же близким к нулю. Когда коэффициент этот практически равен нулю, реостат при различных силах проходящего через него тока, нагреваясь, не будет, однако, менять величины своего сопротивления. Этим очень ценным свойством сплавов пользуются для изготовления так называемых *магазинов*

сопротивления, у которых отдельные катушки взяты на определенное число ом, например: 1, 2, 3, 5, 10 ом. Рис. 12 дает изображение магазина сопротивления с пятью гнездами и штепселями. Включив штепсель в 4-е гнездо, мы выключили или, вернее, замкнули на короткое сопротивление в 4 ома и потому ввели в цепь лишь $1+2+3+5=11$ ом. Такой магазин при наличии достаточного числа штепселей и катушек дает возможность комбинировать сопротивления на различные величины. Подобно этому и на рис. 10b реостат имеет рукоятку, от положения которой зависит величина введенного в цепь сопротивления.

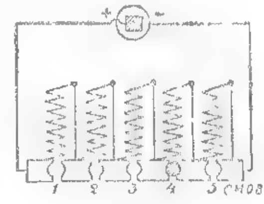


Рис. 12

Кроме металлических реостатов применяются на практике хотя и реже *жидкостные реостаты* — в форме сосудов, наполняемых обычно раствором соды или подкисленной водой. На рис. 13 изображены схематически пусковой реостат *ПР* для мотора *M* и нагрузочный реостат *НР* для динамомашины *D*. Испытуемая машина, вращаемая мотором, дает ток вместо ламп накаливания и других приемников в бочку с раствором соды, поташа или поваренной соли, каковой, принимая на себя ток, таким образом заменяет для машины полезную нагрузку внешней цепи.

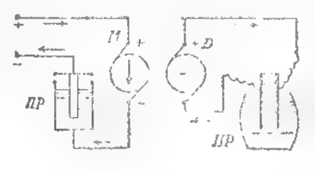


Рис. 13.

В лабораторной практике часто применяют в качестве регулировочных и нагрузочных реостатов ламповые реостаты, в которых электрические лампы соединяются параллельно.

Электрические нагревательные приборы (кипятильники, кухонные плиты, утюги, различные грелки и т. д.) также представляют собою реостаты, изготовляемые из сплавов большого удельного сопротивления. Получаемое в них от нагревания электрическим током тепло идет на полезную работу (см. § 23)

Из перечисленных в таблице VI сплавов применяются: манганин — в магазинах сопротивлений и в измерительных приборах, при чем никель в подобных сплавах иногда заменяют алюминием; никелин, нейзильбер, реостан, реотан, константан — в пусковых

Таблица VI

Название	Составные части	Удельное сопротивление	Температурный коэффициент	Максимальная допустимая температура °C
Нейзильбер	60 ч. меди, 25 — цинка, 15 — никеля, железо	0,3010	0,00036	200
Патентованный никель	75 ч. меди, 25 никеля, марганец, железо	0,[illegible]420	0,00019	200
Никелин	62 ч. меди, 18 — никеля, 20 — цинка, железо, марганец	0,4[illegible]00	0,00030	200
Константан	60 ч. меди, 40 никеля	0,4800	—0,00003	500
Манганин	84 ч. меди, 12 марганца, 4 — никеля	0,4000	0,00000	50
Круппин (ферроникель)	75 ч. железа, 25 — никеля, марганец, кремний	0,8510	0,00070	500
Реотан	Медь, никель, цинк, железо	0,4700	0,00041	200
Резистан	Медь, марганец, никель	0,5100	0,0[illegible]001	200
Хромалой IV	80 ч. никеля, 20 хрома	1,[illegible]000	0,00019	1100
Хромель	80 ч. никеля, 20 хрома	1,0300	0,00011	1090
Нихром	Никель, хром, железо	1,1000	0,00017	1000
Комет	Никель, хром, железо	0,8[illegible]00	0,00070	800
Сихром	Кремний, хром, железо	1,1300	0,000025	800
Платино иридиевый сплав	Платина, иридий	0,3100	0,00052	1500

реостатах; константан, круппин — в регулировочных реостатах, работа которых связана с длительным нагреванием; никель-хромовые сплавы, известные под общим названием нихромов, сихром и платиноиридиевый сплав — в нагревательных приборах; платино-иридиевая проволока — в тепловых измерительных приборах.

Сечение проволоки выбирают с таким расчетом, чтобы нагрев не был ниже предела, указанного в последнем столбце таблицы VI, учитывая при этом условия охлаждения, при которых должна работать данная проволока. В частности в отдельных случаях для нихрома и никелина можно пользоваться данными нагрузки, приводимыми в таблице VII.

Таблица VII.

Диаметр проволоки (мм)	Допускаемая сила тока (ампер)	
	Нихром	Никелин
0,2	1,07	1,6
0,5	2,6	4,9
0,76	4,1	8,3
1,00	5,4	11,0
1,5	7,6	18,0
2,0	10,0	27,0
2,5	13,0	36,0
3,0	15,0	45,0
4,0	21,0	70,0

§ 17. Задачи.

1. К цепи в 110 вольт (рис. 14*a*) присоединен дуговой фонарь *A*, требующий для нормального своего горения напряжение 40 вольт при силе тока в 10 ампер, почему в цепь дуговой лампы включен реостат *P*. Требуется определить его сопротивление.

Первый способ. Пренебрегая сопротивлением проводов, как незначительным, получим, что в реостате должно поглощаться напряжение 110 — 40 = 70 вольт. Следовательно, по закону Ома, его сопротивление будет $R = 70 : 10 = 7$ ом.

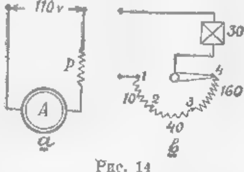


Рис. 14

Второй способ. Сопротивление

всей цепи, по закону Ома, $R = 110 : 10 = 11$ ом, сопротивление дуговой лампы $R_1 = 40 : 10 = 4$ ома, откуда сопротивление реостата $R_2 = R - R_1 = 11 - 4 = 7$ ом.

2. В цепь напряжением 120 вольт включен некоторый приемник с сопротивлением в 30 ом. Требуется подсчитать реостат, при помощи которого можно было бы пропускать через приемник ток в 4, 3, 1,5 и 0,5 ампера.

Кроме расчета, составить схему и таблицу, показывающие величины вводимого посредством реостата в цепь сопротивления при различных положениях его рукоятки.

Сопротивление всей цепи по закону Ома будет:

для 4 ампер . . . 120 : 4 = 30 ом (реостат не требуется)
» 3 » . . . 120 : 3 = 40 » (реостат на 40 − 30 = 10 ом)
» 1,5 » . . . 120 : 1,5 = 80 » (» » 80 − 30 = 50 »)
» 0,5 » . . . 120 : 0,5 = 240 » (» » 240 − 30 = 210 »)

Рисунок 14*b* дает соответствующую схему, а цифровые данные приведены в таблице VIII.

3. Рассчитать комнатную грелку для рабочей силы тока в 5 ампер при напряжении в 110 вольт, подобрав соответствующий диаметр проволоки из нихрома.

Сопротивление прибора, согласно закону Ома

$$R = 110 : 5 = 22\ \Omega$$

Подходящая проволока из нихрома, по данным таблицы VII, будет диаметром в 1 мм, ее сечение вычислится по известной из геометрии формуле для площади круга $\frac{\pi d^2}{4}$, где $\pi = 3,14$, а d — диаметр круга.

Итак

$$q = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1^2}{4} = 0,788 \text{ кв. мм}$$

Длину проволоки находим по формуле (6), учитывая, что по таблице VI удельное сопротивление нихрома $\rho = 1,1$:

$$l = \frac{Rq}{\rho} = \frac{22 \cdot 0,788}{1,1} \approx 15,8 \text{ м}$$

Если предположить, что условия теплоотдачи и, следовательно, охлаждения проволоки будут весьма благоприятны, то можно остановиться и на диаметре в 0,76 мм. В этом случае будем иметь:

$$q = \frac{\pi \cdot 0,76^2}{4} = 0,4 [illegible] \text{ кв. мм}$$

и

$$l = \frac{22 \cdot 0,4[illegible]}{1,1} [illegible] 9 \text{ м}$$

Таблица VIII

Требуемая сила тока (амперы)	Необходимое общее сопротивление цепи	Сопротивление реостата	
		Включено	Положение рукоятки
4	30	[illegible]	[illegible]
3	40	10	2
1,5	80	50	3
0,5	240	210	4

§ 18. Последовательное и параллельное соединения.

На рис. 9*b* динамомашина D, приемник K и реостат P так соединены проводами, что составляют единый замкнутый круг, почему определенное количество электричества протекает последовательно от плюса машины по левому проводу, через приемник, снова по проводу в реостат и оттуда через проводничок к минусу машины. Таким образом все части цепи соединены здесь *последовательно*. В рассмотренном нами случае говорят о последовательном соединении приемника тока и реостата; такой же случай имеем мы в задаче 1 § 17 (дуговая лампа и реостат), при чем во всех случаях сопротивления последовательно соединенных элементов цепи складывают. Следовательно, когда мы имеем сопротивления r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 и r_6, соединенные последовательно, то общее их сопротивление будет:

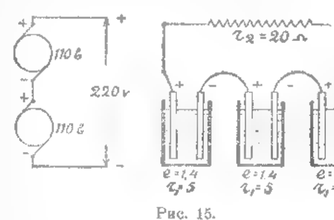


Рис. 15.

$$R = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + r_6 = \Sigma r,$$

где Σ — знак суммы, показывающий, что нужно сложить r с различными цифрами (справа внизу буквы).

На рис. 15 мы имеем дело также с случаем последовательного соединения источников тока. Мы видим в таком соединении на первой схеме две машины, работающие на общую цепь, и на

второй схеме батарею из трех последовательно соединенных элементов. Машины первой схемы, имея каждая напряжение 110 вольт, дают в цепь удвоенное напряжение 220 вольт. Элементы второй схемы работают в цепь с внешним сопротивлением в 20 ом при общем напряжении батареи 1,4·3 = 4,2 вольта. Применяя к последнему случаю закон Ома, можем написать:

$$I = \frac{1{,}4 \cdot 3}{5 \cdot 3 + 20} = \frac{4{,}2}{35} = 0{,}12 \text{ A}.$$

Если вместо трех мы возьмем n элементов, каждый сопротивлением r_1, при сопротивлении внешней цепи r_2, то, подставляя вместо цифр соответствующие буквы, можем написать:

$$I = \frac{en}{r_1 n + r_2} \qquad (10)$$

При *параллельном* соединении сопротивлений ток от источника электрической энергии идет, разветвляясь по этим сопротивлениям. Схемы рис. 16 дают случаи параллельного соединения звонков и ламп накаливания. Если каждая лампа при сопротивлении 220 ом, будучи включена в цепь напряжения 110 вольт, потребляет ток 110 : 220 = 0,5 ампера, то три таких лампы потребуют от электрической станции ток в 0,5·3 = 1,5 ампера, и потому их общее сопротивление будет:

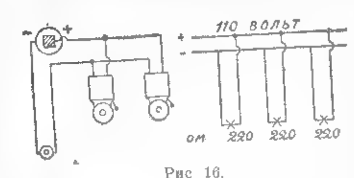


Рис 16.

$$R = \frac{110}{0{,}5 \cdot 3} = \frac{110}{1{,}5} = \frac{220}{3} = 73{,}33\ \Omega,$$

т. е. в 3 раза меньше сопротивления одной лампы. Если таких ламп будет n и сопротивление каждой лампы r, то их общее сопротивление при параллельном соединении:

$$R = \frac{r}{n}.$$

Несколько сложнее будет случай, когда соединены параллельно сопротивления различной величины. На рис. 17 представлены сопротивления r_1 и r_2, питающиеся током от машины D.

Если к точкам A и B приложено напряжение e, то по ветвям пойдут токи: по верхней

$$i_1 = \frac{e}{r_1},$$

по нижней

$$i_2 = \frac{e}{r_2},$$

и, следовательно, машина должна давать ток, равный их сумме:

$$I = i_1 + i_2. \qquad (11)$$

Таким образом для точки A количество электричества или, иначе, ток, притекающий к точке разветвления, равен сумме токов, утекающих от нее, и далее — сумма сил токов, притекающих к точке B разветвления, равна силе тока, утекающего от нее. Это правило относительно разветвленных токов составляет так называемый первый *закон Кирхгофа*, который дает возможность решать ряд вопросов по параллельно соединенным цепям. Воспользуемся вышеприведенными выражениями для двух параллельных ветвей и представим эти выражения в виде произведения тока на сопротивления $e = i_1 r_1$; $e = i_2 r_2$. В новых выражениях левые части равны, вследствие чего мы можем приравнять отдельно правые части и тогда получим:

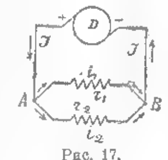


Рис. 17.

$$i_1 r_1 = i_2 r_2.$$

Представляя полученное равенство в виде пропорции (разделив обе его части на $i_2 r_1$), можем написать:

$$i_1 : i_2 = r_2 : r_1, \qquad (12)$$

т. е. *силы токов отдельных ветвей обратно-пропорциональны сопротивлениям этих ветвей.*

Таким образом, если мы имеем несколько параллельных ветвей, то ток главной цепи будет равняться сумме ответвленных токов, и для получения таковых нужно общую силу тока разделить обратно-пропорционально сопротивлениям. Равенство (12) можно написать в несколько ином виде, а именно так:

$$i_1 : i_2 = \frac{1}{r_1} : \frac{1}{r_2},$$

т е силы токов отдельных параллельных ветвей *прямо-пропорциональны* величинам, обратным сопротивлениям и называемым *проводимостями*

Исходя из этого, если мы имеем ряд параллельно соединенных сопротивлений и знаем их величины, равно как и силу тока, притекающего по главному проводу к узлу, мы можем применить правило пропорционального деления и определить силу тока каждой ветви

Пусть ток в 80 ампер, идущий по главной цепи, разветвляется по 4 ветвям, представляющим сопротивления в 24, 6, 3 и 8 ом Расположим вычисление по помещаемой ниже таблице IX

Таблица IX

№ ветви	Сопротивления (омы)	Проводимости	Доли	Ток в ветви
1	24	$^1/_{24}$	1	5
2	[illegible]	$^1/_6$	4	[illegible]
3	3	$^1/_3$	8	40
4	8	$^1/_8$	[illegible]	15
	Итого		[illegible]	80

Дроби, выражающие проводимости, как это делается в арифметическом правиле пропорционального деления, приводим к одному знаменателю (24), откидывая который, получаем числа 4 и графы. Имея всего 16 долей, находим, что на одну долю приходится ток $80:16 = 5$ амперам, после чего умножением 5 на число долей определяем ток в каждой ветви.

Вернемся к первому закону Кирхгофа [формула (11)] и, применяя к нему закон Ома, напишем

$$\frac{e}{R} = \frac{e}{r_1} + \frac{e}{r_2},$$

откуда

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \qquad (13)$$

и, значит, таким же образом для n ветвей:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} + \cdots + \frac{1}{r_n} = \Sigma\frac{1}{r}, \qquad (14)$$

т. е общая проводимость $\frac{1}{R}$ ветвей равна сумме их отдельных проводимостей. Со знаком суммы мы познакомились на стр. 39.

При двух параллельных ветвях общее их сопротивление может быть определено из формулы (13) и будет равно:

$$R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \qquad (15)$$

При трех ветвях выражение примет более сложный вид:

$$R = \frac{r_1 r_2 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_1 r_3} \qquad (16)$$

Наконец, если все ветви имеют равные сопротивления (r), то из формул (15) и (16) имеем:

для двух ветвей

$$R = \frac{r}{2},$$

для трех ветвей

$$R = \frac{r}{3}$$

и, значит, для n ветвей

$$R = \frac{r}{n}, \qquad (17)$$

т. е. выражение, к которому мы уже пришли в начале настоящего параграфа, когда рассматривали ветви с лампами накаливания.

Упомянутый нами Кирхгоф — немецкий физик (1824—1887). Им формулирован также и так называемый *второй закон Кирхгофа* относительно последовательного соединения частей электрической цепи, гласящей так: во всякой замкнутой цепи алгебраическая сумма всех электродвижущих сил равна алгебраической сумме всех потерь напряжения. Исходя из него, мы вместо формулы (5) можем написать:

$$\Sigma e = \Sigma IR$$

Заметим, что мы применяем выражение «алгебраическая» сумма, так как мы приписываем э.д.с. знак плюс или минус, смотря по направлению тока.

Заслуга Кирхгофа заключается не в открытии какого-либо закона, как, например, закон Ома, а лишь в точной и ясной формулировке определенных правил. Поэтому часто его законы называются правилами Кирхгофа.

Рис. 18.

Рис. 15 дает нам последовательное соединение элементов и машин; при наших рассуждениях в обоих случаях э.д.с. источников тока мы складывали. При таком соединении весьма важно обращать внимание на знаки полюсов, так как в противном случае может получиться не последовательное соединение, а встречное, как это имеет место на схеме 1-й рис. 18. Здесь элемент с э.д.с. e_3 включен навстречу двум остальным, почему, применяя к данному случаю закон Ома, мы должны написать:

$$I = \frac{e_1 + e_2 - e_3}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}$$

или

$$e_1 + e_2 - e_3 = Ir_1 + Ir_2 + Ir_3 + Ir_4.$$

Мы видим, что полученное нами из закона Ома последнее выражение есть не что иное, как формула 2-го закона Кирхгофа. Мы видим вместе с тем, что встречное включение источников тока уменьшает силу тока в цепи, почему является невыгодным.

Правая схема рис. 18 дает параллельное соединение источников тока, работающих на внешнюю цепь с сопротивлением r_2. Напряжение во внешней цепи (сопротивление r_2) в этом случае остается равным напряжению одного элемента, сопротивление же батареи [формула (17)] меньше сопротивления одного элемента (при трех элементах данной схемы в 3 раза меньше). Э.д.с. всех параллельно соединенных элементов должны быть равны, так как иначе источник тока с большей э.д.с. будет разряжаться на источник тока с меньшей э.д.с. Если мы имеем батарею из n параллельно соединенных элементов, с сопротивлением каждый r_1 ом, работающую на внешнюю цепь,

сопротивление которой равно r_2, то, принимая во внимание, что сопротивление батареи равно $r_1 : n$, можем написать:

$$I = \frac{e}{\frac{r_1}{n} + r_2} \qquad (18)$$

Останавливаясь на формулах (10) и (18), надлежит указать, что способ соединения элементов зависит от величины сопротивления внешней цепи. Целесообразно соединять элементы параллельно при малых внешних сопротивлениях и последовательно при больших сопротивлениях внешней цепи, так как при таких соединениях сила тока получается больше. Задача 10 § 19 является иллюстрацией для подтверждения сказанного. Таким образом вопрос о наивыгоднейшем соединении элементов приходится решать особо для каждого отдельного случая.

Кроме последовательного и параллельного соединений существует (и именно оно для определенного случая может быть наивыгоднейшим) смешанное или последовательно-параллельное соединение элементов, о каковом будет речь в § 20.

§ 19. Задачи.

1. В цепь напряжения 220 вольт включены последовательно три дуговые лампы, требующие при правильном горении каждая по 47 вольт, при силе тока в 12 ампер. Определить сопротивление реостата, который необходимо включить последовательно с этими лампами

Расход напряжения в лампах $e_1 = 47 \cdot 3 = 141$ вольт.

Потеря напряжения в реостате $e_2 = 220 - 141 = 79$ вольт.

Сопротивление реостата $R = 79 : 12 = 6{,}58$ ома.

2. Батарея из 5 последовательно соединенных сухих элементов (напряжение каждого 1,5 вольта, сопротивление 0,5 ома) работает на внешнюю цепь, в которую включены последовательно два сопротивления в 7,5 и 40 ом. Определить силу тока в цепи.

Сопротивление внешней цепи $r_2 = 7{,}5 + 40 = 47{,}5$ ома.

По формуле (10) сила тока в цепи

$$I = \frac{1{,}5 \cdot 5}{0{,}5 \cdot 5 + 47{,}5} = \frac{7{,}5}{50} = 0{,}15 \text{ A}.$$

3. В цепи, состоящей из четырех последовательно соединенных сопротивлений, при напряжении 12 вольт идет ток в 0,5 ампер. Два из них равны 2 и 7 омам. Определить величины двух остальных сопротивлений, если они равны друг другу.

Общее сопротивление цепи, по закону Ома:

$$R = 12 : 0{,}5 = 24\ \Omega.$$

Два известных сопротивления составляют вместе:

$$R_1 = 3 + 7 = 10\ \Omega$$

Остальные два сопротивления вместе составляют:

$$R_2 = R - R_1 = 24 - 10 = 14\ \Omega$$

Так как они равны, то сопротивление каждого из них:

$$r = 14 : 2 = 7\ \Omega.$$

4. Динамомашина (рис. 17) дает ток в 120 ампер в две параллельные ветви. Определить силу тока второй ветви, если по первой идет ток в 84 ампера.

На основании формулы (11), $i_2 = I - i_1 = 120 - 84 = 36$ ампер.

5. Ток силою в 49,4 ампера разветвляется по 4 сопротивлениям в 2, 3, 7 и 5 ом. Определить силы тока в ветвях.

Составляем табличку X.

Таблица X.

№ ветви	Сопротивление (омы)	Проводимости	Доли	Сила тока в ветви
1	2	$\frac{1}{2}$	105	21
2	3	$\frac{1}{3}$	0	14
3	7	$\frac{1}{7}$	30	6
4	5	$\frac{1}{5}$	42	8,4
		Итого . . .	247	49,4 амп.

6. Найти общее сопротивление двух параллельных ветвей в 6 и 8 ом.

По формуле (15):

$$R = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} = \frac{6 \cdot 8}{6 + 8} = \frac{48}{14} = 3{,}43\ \Omega.$$

7. В цепь динамомашины включены параллельно 31 лампочка с сопротивлением каждая 620 ом. Определить их общее сопротивление.

По формуле (17)

$$R = 620 : 31 = 20\ \Omega.$$

8. Четыре элемента Мейдингера (напряжение 1,18 вольта, внутреннее сопротивление 6 ом) соединены параллельно и работают на внешнюю цепь с сопротивлением 5 ом. Определить силу тока в цепи.

По формуле (18):

$$I = \frac{1{,}18}{\frac{6}{4} + 5} = \frac{1{,}18}{1{,}5 + 5} = \frac{1{,}18}{6{,}5} = 0{,}181\ \text{A}.$$

9. Два элемента: Мейдингера ($e_1 = 1{,}18$ V, $r_1 = 6\ \Omega$) и Лекланше ($e_2 = 1{,}4$ V, $r_2 = 5\ \Omega$) соединены ошибочно не последовательно, а навстречу и работают на внешнюю цепь с сопротивлением $r_3 = 20$ ом. Определить силу тока, идущего в таком случае в цепи, и сравнить ее с силой тока, который должен был бы итти при правильном (последовательном) соединении элементов.

При встречном соединении элементов сила тока в цепи:

$$I = \frac{e_2 - e_1}{r_1 + r_2 + r_3} = \frac{1{,}4 - 1{,}18}{6 + 5 + 20} = \frac{0{,}22}{31} = 0{,}0071\ \text{A} = 7{,}1\ \text{mA}.$$

При последовательном соединении элементов сила тока в цепи:

$$I = \frac{e_1 + e_2}{r_1 + r_2 + r_3} = \frac{1{,}4 + 1{,}18}{6 + 5 + 20} = \frac{2{,}58}{31} = 0{,}083\ \text{A, или } 83\ \text{mA}.$$

Сравнивая полученные результаты, мы видим, что во втором случае силы тока больше на $83 - 7{,}1 = 75{,}9$ mA, или в $83 : 7{,}9 = 11{,}7$ раза больше.

10. Имеется батарея из 4 элементов Лекланше (э.д.с. $= 1{,}4$ вольта, внутреннее сопротивление $r_1 = 5$ ом) и две внешних цепи с сопротивлением в 2 и 30 ом. Выяснить разницу в работе одного элемента и всей батареи при последовательном и параллельном соединении элементов — в отдельности на цепь в 2 и 30 ом.

Первый случай: сопротивление внешней цепи $r_2 = 2$ ома.

Имеем:

при работе одного элемента, согласно формуле (4),

$$i_1 = \frac{1{,}4}{5 + 2} = \frac{1{,}4}{7} = 0{,}2\ \text{A};$$

при параллельном соединении элементов, согласно формуле (18),

$$i_2 = \frac{1{,}4}{\frac{5}{4} + 2} = \frac{1{,}4}{3{,}25} = 0{,}43\ \text{A},$$

при последовательном соединении элементов, согласно формуле (10),

$$i_3 = \frac{1{,}4 \cdot 4}{5 \cdot 4 + 2} = \frac{5{,}6}{22} = 0{,}254\ \text{A}.$$

Результаты показывают, что при малом сопротивлении внешней цепи выгоднее всего параллельное соединение элементов. Последовательное соединение дает совсем незначительное увеличение силы тока в сравнении с работой даже одного элемента.

Второй случай. Сопротивление внешней цепи $r_2 = 30$ ом.

Имеем:

при работе одного элемента

$$i_1 = \frac{1{,}4}{5 + 30} = 0{,}04\ \text{A};$$

при параллельном соединении элементов

$$i_2 = \frac{1{,}4}{\frac{5}{4} + 30} = \frac{1{,}4}{31{,}25} = 0{,}0448\ \text{A};$$

при последовательном соединении элементов

$$I_3 = \frac{1{,}4 \cdot 4}{5 \cdot 4 + 30} = \frac{5{,}6}{50} = 0{,}112 \text{ A}.$$

Подсчеты показывают, что при большом сопротивлении внешней цепи выгоднее последовательное соединение элементов, так как оно дает наибольшую силу тока. Параллельное же соединение дает совсем незначительное увеличение тока, даже в сравнении с работой одного элемента.

§ 20. Смешанное соединение.

Смешанное соединение представляет сочетание последовательного и параллельного соединений и потому называется еще

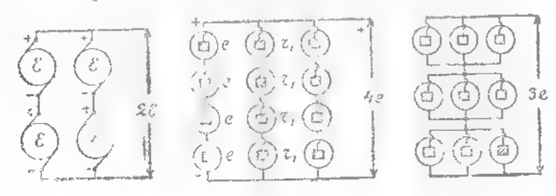


Рис. 19

последовательно-параллельным. Так, первая слева схема рис. 19 дает изображение параллельного соединения двух групп из двух последовательно соединенных машин в каждой группе. Если напряжение одной машины E, то две машины, последовательно соединенные, дают в цепь ток при напряжении $2E$. Подобно этому на средней схеме того же рисунка имеем напряжение цепи $4e$, так как в каждой ветви показаны 4 последовательно соединенных элемента. Сопротивление каждой ветви составит $4r_1$, а сопротивление всей батареи будет в 3 раза меньше, т. е.

$$\frac{4}{3} r_1$$

Если такая батарея работает на внешнюю цепь, сопротивление которой r_2, то сила тока в цепи может быть определена по формуле:

$$I = \frac{4e}{\frac{4}{3} r_1 + r_2}$$

Если число параллельных групп у нас m (а не 3, как выше в примере) и в каждой по n (а не 4) последовательно соединенных элементов, то будем иметь формулу:

$$I = \frac{ne}{\frac{n}{m} r_1 + r_2}. \qquad (19)$$

Схема первая (справа) рис. 19 также показывает смешанное соединение 9 элементов. Такой способ последовательного соединения ряда параллельно соединенных групп элементов встречается весьма редко.

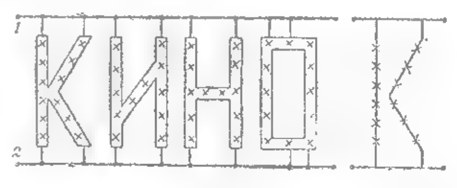


Рис. 20

Обычное соединение приемников цепи — параллельное. Лампы накаливания любой квартирной установки, электродвигатели на заводах и в мастерских приключаются к сети обыкновенно параллельно, в противном случае, т. е. при последовательном соединении приемников, при выключении одного из них ток не шел бы и через другие (при перегорании одной лампочки накаливания гасли бы и прочие). Но мы уже отмечали последовательное соединение дуговых ламп в сети. Следовательно, ряд таких параллельных групп будет находиться, если их рассматривать как одно целое, уже в последовательно-параллельном соединении. Моторы трамвайного вагона (их в вагоне обычно два) работают и в последовательном, и в параллельном соединении. Рис. 20 со словом «кино» имеет 8 параллельных групп, и в каждой группе по 6 последовательно соединенных лампочек. Более наглядно соединение лампочек показано на рисунке справа для буквы K. В букве H тоже 12 лампочек; из двух на средней перекладине одна принадлежит к левой, а другая к правой группе. При перегорании одной лампочки в какой-либо группе вся эта группа тухнет, что иногда и приходится замечать на электрических световых рекламных вывесках. В этом заключается

неудобство такого соединения лампочек; зато проводка к ним обходится дешевле, и самые низковольтные лампочки прочнее. Сверх того на напряжение 110 вольт лампочки меньше как на 5 свечей не готовятся; при напряжении в 220 вольт эта цифра уже повышается до 10. Если же последовательно соединены 6 ламп, то при напряжении в сети 110 вольт напряжение каждой лампочки будет составлять $110:6=18$ вольт, почему и сила света может быть взята менее 5. В итоге число свечей на вывеске будет меньше, и оттого меньше расход электрической энергии.

При пользовании формулами (10) и (18) мы указали когда является более выгодным последовательное и параллельное соединение элементов. Одно из этих соединений однако не является непременно выгодным, так как во многих случаях является выгодным смешанное соединение элементов. Пусть всего у нас n элементов соединено последовательно, и параллельных групп взято m. Тогда общее число элементов может быть получено из выражения

$$N=mn \qquad (20)$$

Мы уже знаем, что при малом сопротивлении внешней цепи элементы рекомендуется соединять параллельно, чтобы тем самым получать малое внутреннее сопротивление батареи, а при большом сопротивлении внешней цепи элементы соединяют последовательно и, значит, получают большое сопротивление цепи. Поэтому внешнему сопротивлению цепи надлежит по возможности противопоставлять равное ему сопротивление батареи, т. е., вообще говоря, надлежит соблюдать равенство обоих слагаемых формулы (19):

$$\frac{nr_1}{m}=r_2. \qquad (21)$$

Определяя из него n, имеем

$$n=\frac{r_2}{r_1}m.$$

Подставим полученную величину n в формулу (20).

$$N=m\frac{r_2}{r_1}m=m^2\frac{r_2}{r_1},$$

откуда

$$m^2=N\frac{r_1}{r_2}.$$

Чтобы получить m, надо извлечь квадратный корень из

$$N\frac{r_1}{r_2}$$

по формуле:

$$m=\sqrt{N\frac{r_1}{r_2}} \qquad (22)$$

Если m не получится целым числом, надо взять ближайшее целое.

С помощью этой формулы, имея в своем распоряжении N элементов, мы можем определить, какое количество (m) параллельных групп надлежит нам взять в каждом отдельном случае *для наивыгоднейшего соединения элементов.*

Представим себе, что во второй схеме рис. 19 вместо элементов мы имеем смешанное соединение каких-нибудь равных по величине сопротивлений. Очевидно, что от этого суть дела не изменится, и общее сопротивление всей системы, как и для случая элементов, взятых в таком же соединении, будет

$$R=\frac{n}{m}r, \qquad (23)$$

где m — число параллельных групп, n — число последовательно соединенных сопротивлений и r — величина каждого отдельного сопротивления.

§ 21. Задачи.

1. Определить общее сопротивление 20 сопротивлений в 5 ом, соединенных в две параллельные группы.

По формуле (23):

$$R=\frac{10}{2}\cdot 5=25\ \Omega.$$

2. В задаче 10 § 19 4 элемента Лекланше работают на цепь с сопротивлением в 2 и 30 ом. Определить наивыгоднейшее соединение элементов для обоих случаев.

Пользуясь формулой (22), находим наивыгоднейшее число параллельных групп:

для работы на внешнее сопротивление в 2 ома

$$m=\sqrt{4\cdot\frac{5}{2}}=\sqrt{10}\approx 3.$$

Так как число групп получилось равным 3, то все элементы, числом 4, надобно соединить параллельно;

для работы на внешнее сопротивление в 30 ом

$$m = \sqrt{4 \cdot \frac{5}{30}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \approx 1$$

т. е. все элементы нужно соединить последовательно (в одну группу).

3. Батарею из 12 элементов Лекланше (э.д.с. 1,4 вольта, внутреннее сопротивление 5 ом) нужно включить на внешнее сопротивление в 15 ом. Определить наивыгоднейшее число параллельных групп.

По формуле (22) число параллельных групп:

$$m = \sqrt{12 \cdot \frac{5}{15}} = \sqrt{4} = 2.$$

Проверим наше решение, беря различные способы соединения элементов нашей батареи

1 группа (все элементы соединены последовательно)

$$i_1 = \frac{1{,}4 \cdot 12}{5 \cdot 12 + 15} = 0{,}224 \text{ A.}$$

2 параллельные группы [получено выше по формуле (22)]

$$i_2 = \frac{1{,}4 \cdot 6}{\frac{5 \cdot 6}{2} + 15} = 0{,}280 \text{ A.}$$

3 параллельные группы

$$i_3 = \frac{1{,}4 \cdot 4}{\frac{5 \cdot 4}{3} + 15} = 0{,}258 \text{ A.}$$

4 параллельные группы:

$$i_4 = \frac{1{,}4 \cdot 3}{\frac{5 \cdot 3}{4} + 15} = 0{,}224 \text{ A.}$$

6 параллельных групп:

$$i_5 = \frac{1{,}4 \cdot 2}{\frac{5 \cdot 2}{6} + 15} = 0{,}168 \text{ A.}$$

12 элементов соединены параллельно:

$$i_6 = \frac{1{,}4}{\frac{5}{12} + 15} = 0{,}091 \text{ A.}$$

Таким образом из всех возможных 6 случаев наивыгоднейшим является второй, соответствующий решению вопроса согласно формуле (22). Кроме того надлежит отметить, что 1-й случай (последовательное соединение) дает эффект, одинаковый с четвертым случаем, когда элементы соединены в 4 параллельные группы, по 3 элемента в каждой группе.

4. Пять сопротивлений сгруппированы, как показано на рис. 21, и присоединены к сети напряжением 120 вольт. Определить, какая сила тока поступает в данную группу сопротивлений, если величина их составляет (см. рисунок) 16, 12, 24, 28, и 12 ом. Такую задачу приходится решать последовательно объединяя сопротивления.

Общая величина сопротивлений r_2 и r_3, по формуле (15):

$$R_1 = \frac{r_2 \cdot r_3}{r_2 + r_3} = \frac{12 \cdot 24}{12 + 24} = \frac{12 \cdot 24}{36} = 8\ \Omega$$

Так как с ними последовательно включено сопротивление r_4, то общая величина всех трех сопротивлений равна:

$$R_2 = 8 + 28 = 36\ \Omega.$$

С группой этих трех сопротивлений соединено параллельно сопротивление r_5. Общая величина всех четырех сопротивлений:

$$R_3 = \frac{36 \cdot 12}{36 + 12} = \frac{36 \cdot 12}{48} = 9\ \Omega$$

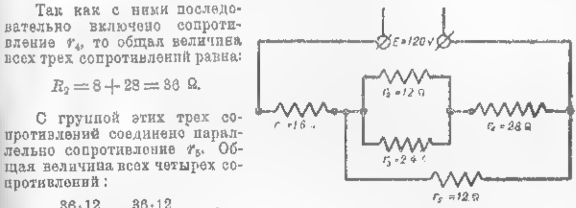


Рис. 21.

С группой этих четырех сопротивлений соединено последовательно сопротивление r_1. Общая величина всех пяти сопротивлений:

$$R = r_1 + R_2 = 16 + 9 = 25\ \Omega.$$

Отсюда сила тока в сети:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{120}{25} = 4{,}8 \text{ A.}$$

§ 22. Вопросы для повторения.

1. От чего зависит сопротивление проводников?
2. Что такое удельное сопротивление и проводимость?
3. Какой материал применяется для изготовления проводников?
4. Как влияет температура на величину сопротивления проводов?
5. Как в простейшем случае рассчитывается провод и какие соображения принимаются при этом во внимание?
6. Что такое реостаты и магазины сопротивлений?
7. Какой материал применяется в реостатах и магазинах сопротивления? Какие требования предъявляются к этому материалу?
8. Какой материал применяется для изготовления нагревательных приборов? Какие требования к нему предъявляются?
9. Что такое последовательное соединение источников тока и приемников? Какой вид принимает закон Ома для такого соединения?
10. Что такое параллельное соединение источников тока или приемников? Какой вид принимает закон Ома для такого соединения?
11. Какие требования надлежит выполнить при параллельном соединении источников тока?

12. В чем состоит первый закон Кирхгофа?
13. Как разветвляется ток в параллельно соединенных сопротивлениях?
14. Как найти общее сопротивление нескольких параллельно соединенных сопротивлений?
15. В чем состоит смешанное соединение источников тока и приемников? Какой вид принимает закон Ома для такого соединения?
16. Когда представляется выгодным соединять гальванические элементы последовательно, параллельно и последовательно-параллельно?
17. По какой формуле можно определить, какое соединение элементов для каждого отдельного случая является наивыгоднейшим?
18. Какое неудобство получается при последовательном соединении ламп? Где такое соединение применяют?
19. Придумать задачи на определение сопротивления провода, величины его нагревания, на расчет сечения провода, на определение сопротивления параллельно соединенных ветвей, на различные случаи соединения гальванических элементов?

§ 23. Электрическая работа и мощность. Закон Джоуля-Ленца.

При прохождении тока по проводнику он нагревается, и кроме того вокруг него проявляется ряд механических действий, как, например, свободно подвешенная магнитная стрелка поворачивается, между проводниками возникает взаимодействие в виде притяжения или отталкивания; жидкости под действием тока разлагаются на составные части; проводник с током, помещенный в магнитное поле, начинает двигаться и т. д. Все эти явления и ряд других показывают, что электрический ток производит работу.

Рассматривая нагревание проводника током, английский физик Джоуль (1818—1889) нашел, что количество тепла Q, выделяемое за время t сек. при прохождении тока I ампер по проводнику с сопротивлением R ом, прямо-пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению и времени, т. е.:

$$Q = k \cdot I^2 \cdot R \cdot t$$

Число k называется коэффициентом пропорциональности; оно показывает, насколько нужно помножить произведение квадрата силы тока в амперах, сопротивления в омах и времени в секундах, чтобы получить количество тепла в определенных единицах тепла; для единиц тепла малых калорий коэффициент пропорциональности k, согласно ряду опытов, произведенных учеными, в частности русским физиком Ленцем (1804—1865), равен 0,24. На основании этого и зная, что по закону Ома $I \cdot R = E$, мы

можем количество тепла в малых калориях, выделяемое в проводнике, определить по одной из следующих формул:

$$Q = 0{,}24\ I^2 \cdot R \cdot t = 0{,}24\ E \cdot I \cdot t = 0{,}24\ \frac{E^2}{R}\ t. \qquad (24)$$

Если $I = 1$ амперу, $R = 1$ ому или $E = 1$ вольту, то за одну секунду в проводнике выделится тепла 0,24 калории. Таким образом один вольт-ампер (ток силою в 1 ампер при напряжении в 1 вольт) за 1 секунду дает 0,24 калории. Эту работу тока на нагревание примем за единицу и назовем ее *джоулем*. Так как джоуль дает 0,24 малых калорий, то работу тока, на основании формулы (24), можно представить выражением:

$$A = I^2 \cdot R \cdot t = E \cdot I \cdot t = \frac{E^2}{R}\ t \text{ джоулей.} \qquad (25)$$

Работа в единицу времени есть мощность. Электрическую мощность легко получить из формулы (25), приняв $t = 1$. Формула мощности, как и предыдущие, в зависимости от того, какие величины мы в нее вставляем, пользуясь законом Ома, принимает троякий вид:

$$P = I^2 \cdot R; \quad P = E \cdot I; \quad P = \frac{E^2}{R}. \qquad (26)$$

Если имеющиеся в этой формуле электрические величины (E, I, R) равны единице, то и P равно единице. В таком случае говорят, что мощность равна одному *ватту*.[1] Один ватт, следовательно, есть мощность тока силою в 1 ампер при напряжении в 1 вольт. Вводя в формулу мощности в качестве множителя время, мы снова получим работу тока $A = P \cdot t$ джоулей или ватт-секунд.

Мощность в 736 *ватт* соответствует механической мощности в 1 лошадиную силу, равную работе 75 *килограммометров в секунду*. Электрические установки в настоящее время настолько крупны, что измерять их мощность в ваттах и работу в ватт-секундах неудобно, так как при этом получились бы чрезвычайно большие числа. Поэтому мощность и работу обыкновенно выражают в более крупных единицах: мегаваттах, киловаттах и гектоватт- и киловатт-часах.

100 ватт = 1 гектоватту.	3600 ватт-секунд = 1 ватт-часу.
1 000 ватт = 1 киловатту.	100 ватт-часов = 1 гектоватт-часу.
1 000 000 ватт = 1 мегаватту	1000 ватт-часов = 1 киловатт-часу

[1] Применяемый некоторыми термин «уатт» является неправильным. Постановлением ВСНХ для электрической единицы мощности у нас принят термин «ватт».

Применительно к указанным единицам тариф на освещение для жилых помещений устанавливается обыкновенно электростанциями в определенной цене за гектоватт-час, за энергию для электродвигателей — в определенной цене за киловатт-час. Количество выработанной электрической станцией энергии исчисляется киловатт-часами, мощность установленных на станции машин — киловаттами.

Если закон Ома помогает нам уяснять электрические явления и производить различные расчеты, то закон Джоуля дает нам возможность подсчитывать электрическую мощность и энергию. Зная его, мы можем подсчитать, во сколько обходится нам горение ламп, работа электродвигателя и т. д. (см. § 25) и насколько выгодно то или иное устройство (см. §§ 26 и 27).

§ 24. Международные обозначения электрических величин и единиц.

При чтении технической литературы как русской, так и иностранной, часто приходится наблюдать, как одни и те же величины различными авторами обозначаются различными буквами. Во избежание такой пестроты Международной электротехнической комиссией еще в 1915 г. были приняты для различных величин и единиц определенные международные обозначения. Ниже мы помещаем те из них, которые встречаются в настоящей книге.

1. Величины.

Длина	l	Число обор. в мин.	n
Время	t	Темп. по Цельсию	t
Работа	A	Частота	f
Энергия	W	Сдвиг фазы	φ
Мощность	P	Э. д. сила	E
Отдача или коэфиц. полезного действия	η	Сила тока	I
Сопротивление (ваттное)	R	Емкость	C
Сопротивление удельное	ρ	Диэлектрич. постоянная	ε
		Самоиндукция	L

2. Обозначения единиц.

Ампер	A	Ватт-час	Wh
Вольт	V	Вольт-ампер	VA
Ом	Ω ω	Ампер-час	Ah
Джоуль	J	Миллиампер	mA
Ватт	W	Киловатт	kW
Фарада	F	Киловольт-ампер	kVA
Генри	H	Киловатт-час	kWh

m — для обозначения милли-
k — для обозначения кило-

μ — для обозначения микро-
M — для обозначения мега- или мег-

Обозначения п. 2 должны быть употребляемы только после числовых значений. Для лучшего уяснения ниже приводим несколько примеров правильного пользования ими.

Сила тока I равняется 12 амперам	I = 12 A
Напряжение линии электропередачи составляет 30 киловольт	E 30 kV
Абоненту надлежит оплатить 120 гектоватт-часов	120 hWh
Сопротивление лампы накаливания составляет 220 ом	R = 220 Ω
Станция выработала за сутки 2400 киловатт-часов	2400 kWh
В сети пожарной сигнализации идет ток в 40 миллиампер	I = 40 mA
Мощность турбогенератора — 10 000 киловатт	10 000 kW

§ 25. Задачи.

1. Электрическая грелка с сопротивлением в 22 ома потребляет ток в 5A. Определить число калорий, выделяемое грелкой за 12 минут.

Учитывая, что 12 минут составляют 720 сек., находим по формуле (24):

$$Q = 0{,}24 \cdot 5^2 \cdot 22 \cdot 720 = 95\,040 \text{ малых калорий.}$$

2. Определить мощность, потребную для грелки задачи № 1.

По формуле (26):

$$P = 5 \cdot 5 \cdot 22 = 550 \text{ W}$$

3 16-свечная угольная лампа накаливания потребляет ток в 0,5A при напряжении $E = 110$V. Определить мощность, расходуемую лампочкой, и число ватт, приходящееся на 1 свечу.

Расходуемая лампой мощность 110 0,5 = 55 W.

На одну свечу приходится 55 : 16 = 3,5 W.

4. Металлическая 16-свечная лампа накаливания расходует 1,2 ватта на свечу. Определить, какое количество энергии потребуется для нее в течение 5 часов непрерывного горения.

Потребная для лампы мощность $P = 1{,}2 \cdot 16 = 19{,}2$ ватта, что за 5 часов даст.

$$W = 19{,}2 \cdot 5 = 96 \text{ Wh.}$$

5. Динамомашина отдает в цепь 220 киловатт при напряжении 110 вольт. Определить силу тока в цепи.

220 киловатт = 220 000 ватт. По формуле (26)

$$I = \frac{220\,000}{110} = 2000 \text{ A.}$$

6. Определить полезную мощность машины в ваттах, киловаттах и лош. силах, если она дает во внешнюю цепь ток в 1472 A при напряжении 220 вольт.

$$P = 1472 \times 220 = 323\,840 \text{ W} = 323{,}84 \text{ kW} = \frac{323\,840}{736} = 444 \text{ л. с.}$$

7 Какую часть лошадиной силы представляет мощность тока в 7,36 ампера, проходящего по проводнику с сопротивлением в 10 ом.

$$\text{Число лош. сил} = \frac{P}{736} = \frac{I^2 R}{736} = \frac{7{,}36 \cdot 7{,}36 \cdot 10}{736} = [illegible]$$

8. У абонента установлено пять 16-свечных металлических ламп, для которых со станции отпускается эл. энергия по цене 2 коп. за гектоватт-час.

Сколько надлежит заплатить абоненту по месячному счету, если лампы потребляют 1,2 ватта на свечу, число часов горения в сутки составляет в среднем 5 часов, число горящих ламп — 60% от их общего количества и в месяце 30 дней

60% от 5 составляет 3 лампы.

Число свечей у этих ламп 16·3 = 48

Число потребляемых ими ватт 1,2·48 = 57,6.

Расход энергии за сутки 57,6·5 = 288 ватт-часов, а за месяц 288·30 = = 8640 ватт-часов или 86,4 гектоватт-часа, что при цене 2 коп. за 1 гвт-час даст сумму 2·86,4 = 172,8 коп. или 1 р. 73 к.

9. На небольшом заводе установлены два электродвигателя в 7 и 12 лош. сил. Определить стоимость электрической энергии за 1 месяц, если таковая отпускается заводу по 13 коп. за киловатт-час, считая их с установленного киловатта применительно к 200 часам месячной работы двигателей.

Число установленных ватт 736·(7 + 12) = 13 984 W.

Число установленных киловатт — 13,984 kW.

В месяц подлежит оплате киловатт-часов 13,984 × 200 = 2796,8, почему по счету надлежит уплатить

$$13 \times 2796{,}8 = 36\,358{,}4 \text{ коп., или } 363 \text{ р. } 58 \text{ к.}$$

10. Определить стоимость кипячения воды грелкой задач 1—2, если вода закипает через 15 минут и если гектоватт-час стоит 1 коп

Грелка потребляет 550 ватт и дает кипяток через ¼ часа. Расход энергии составляет

$$550 \cdot 0{,}25 = 137{,}5 \text{ ватт-часа или } 1{,}375 \text{ гектоватт-часа.}$$

Следовательно, при стоимости гектоватт-часа в 1 коп. кипячение воды обойдется в 1,375 коп.

11. В конце линии протяжением в 200 м включены приемники, расходующие 6000 ватт при напряжении 120 вольт. Определить сечение проводов этой линии, если напряжение в ее начале составляет 125 вольт.

Приемники расходуют ток силою

$$I = P : E = 6000 : 120 = 50 \text{ A}.$$

Падение напряжения в проводах линии составляет:

$$e = 125 - 120 = 5 \text{ вольт.}$$

Сечение провода, по формуле (9):

$$q = \frac{I \cdot l}{57\, e} = \frac{50 \cdot 200 \cdot 2}{57 \cdot 5} = 70 \text{ мм}^2$$

Сечение это является вполне подходящим и с точки зрения нагрева его током, так как, согласно данным таблицы V, максимальная допустимая сила тока для 70 мм² равна 200 амперам.

12. В помещении не были выключены лампы, которые и горели всю ночь с 10 час. вечера до 8 час. утра. Определить, сколько стоило горение этих ламп за указанный промежуток времени, если ламп было 3, мощностью по 200 ватт, и если стоимость киловатт-часа составляет 15 коп

Лампы расходуют мощность — 200·3 = 600 W или 0,6 kW.

Число часов горения ламп — 10 часов.

Потребленная лампами энергия — 0,6·10 = 6 kWh.

Стоимость ее — 15·6 = 80 коп

§ 26. Полная и полезная мощность. Отдача, или коэффициент полезного действия.

Когда динамомашина или батарея элементов работает на внешнюю цепь, развивая э.д.с. E_0 при силе тока I, то произведение этих величин составит полную мощность тока:

$$P_0 = E_0 \cdot I.$$

Но так как часть напряжения неизбежно всегда теряется внутри источника тока на преодоление его сопротивления, то во внешнюю цепь этот ток отдается при меньшем напряжении, измеряемом у зажимов машины или батареи E, а потому и мощность:

$$P = E \cdot I,$$

отдаваемая этой внешней цепи и называемая полезной, будет меньше полной мощности. Отношение полезной мощности к полной, взятое в виде десятичной дроби или в процентах, называется *отдачей* или *коэффициентом полезного действия* машины

$$\eta = \frac{P}{P_0} = \frac{EI}{E_0 I} \qquad (27)$$

Эта отдача, очевидно, выражается числом отвлеченным и не может быть больше или равна единице. Также очевидно, что, чем ближе отдача к единице, тем выгоднее наша установка, так как тем меньше в ней бесполезные для нас потери.

Подобным же образом мы можем получить и отдачу или коэффициент полезного действия линии передачи, проводов, электрической сети и т. д. Так, например, если в провода поступает ток при напряжении E_1, то вследствие падения напряжения в проводах в конце линии, у приемников, напряжение будет меньше, например, E_2. Тогда отдача линии может быть представлена отношением мощности, отдаваемой с линии P_2, к мощности P_1, поступающей в нее:

$$\eta_1 = \frac{P_2}{P_1} = \frac{E_2 \cdot I}{E_1 \cdot I} \qquad (28)$$

Приемники также имеют свой коэффициент полезного действия, так как, получая мощность, часть ее они расходуют на так называемые потери, и полезно использованная ими мощность будет меньше полной. Следовательно, отношение этих мощностей опять даст нам коэффициент полезного действия приемника.

Человечество гордится и имеет полное право гордиться успехами знания и своими завоеваниями в области техники, но оно должно помнить, что в области наивыгоднейшего использования своих технических устройств оно еще очень далеко от идеала, и впереди его ждет упорная работа. При помощи простого расчета мы можем видеть, какая малая часть, например, энергии угля, сжигаемого в топке парового котла электрической станции, получается в виде механической работы на валу электродвигателя или в виде света в лампочке накаливания. Предположим, что некоторое количество угля при сгорании в топке дало 100 единиц тепла (калорий). Так как паровые установки в лучшем случае могут использовать около 17—23%, то, взяв для примера 15%, получим, что динамомашина получает в виде механической мощности лишь 15 калорий. Если отдача динамомашины составляет 97%, то из этого числа калорий в электрическую сеть в виде электрической энергии будет поступать только 15·0,97 = = 14,55 калорий или 14,55% тепла, полученного в топке.

Но, ведь, и в электрической сети имеют место потери энергии. Приняв их равными 10% (коэф. полезн. д. = 0,9), находим, что к приемнику доходит лишь 14,55·0,9 = 13,095% от первоначально полученных 100 калорий.

Приняв световую отдачу металлической лампы накаливания в 20% (остальная энергия лампы бесполезно для нас уходит на тепло), получим, что в ней для получения световой энергии использовано только 13,095·0,2 = 2,619%. Так как коэффициент полезного действия электродвигателя значительно выше и для нашего подсчета может быть принят равным 0,95, то в нем от 100 первоначальных калорий будет использовано 13,095 × 0,95 = = 12,44%. Коэффициенты полезного действия нами взяты достаточно высокими, почему на практике на преобладающем числе установок при более низких коэффициентах результаты будут еще показательнее

§ 27. Задачи.

1. Динамомашина, развивая э.д.с. в 228 вольт, отдает в сеть ток силою 150 ампер при напряжении у зажимов 220 вольт. Определить отдачу машины

По формуле (27):

$$\eta = \frac{150 \cdot 220}{150 \cdot 228} = 0{,}96$$

2. К лампам накаливания, горящим при напряжении 110 вольт, дается по линии ток в 20 ампер, при чем потеря напряжения в проводах составляет 4 вольта. Определить отдачу проводов.

Напряжение в начале линии 110 + 4 = 114 вольт Отдача проводов

$$\eta = \frac{20 \cdot 110}{20 \cdot 114} = 0{,}965 \text{ или } 96{,}5\%.$$

3. Определить коэффициент полезного действия электродвигателя постоянного тока в 5 л. с., если он при напряжении 110 вольт и при полной нагрузке расходует ток силою в 37 ампер

Мощность, получаемая двигателем $P_1 = 110 \cdot 37 = 4070$ W.

Мощность, отдаваемая двигателем, $P_2 = 736 \cdot 5 = 3680$ W.

Отдача двигателя $\eta = 3680 : 4070 = 0{,}9042$ или 90,42%

4. В электрический кипятильник налит литр воды при температуре 15°, и прибор включен в эл. сеть с напряжением 110 вольт Определить стоимость вскипячения воды при цене гектоватт-часа в 1 коп и коэффициент полезного действия прибора, если вода была доведена до кипения через 14 минут при токе в 5 ампер

14 минут = 840 сек = $^7/_{30}$ часа. 1 литр = 1000 г воды.

Вода нагрелась с 15 до 100° С, следовательно, на 85°

На нагревание воды потребовалось 1000·85 = 85 000 мал. калорий и израсходовано, согласно формуле (24).

$$Q = 0{,}24 \cdot 110 \cdot 5 \cdot 840 = 110\,880 \text{ мал. кал.}$$

Следовательно, отдача кипятильника составит.

$$\eta = \frac{85\,000}{110\,880} = 0{,}7676 \text{ или } 76{,}76\%.$$

Электрической энергии будет израсходовано

$$110 \cdot 5 \cdot {}^7/_{30} = 128{,}3 \text{ ватт-часа или } 1{,}233 \text{ гектоват-часа,}$$

почему стоимость доведения воды до кипения определится суммой

$$1 \cdot 1{,}283 = 1{,}28 \text{ коп.}$$

5. Определить коэффициент полезного действия элемента задачи 4 § 6

По формуле (27):

$$\eta = \frac{E_i I}{E I} = \frac{E_i}{E} = \frac{1{,}2}{1{,}4} = 0{,}857 \text{ или } 85{,}7\%.$$

§ 28. Вопросы для повторения.

1. Каким образом доказывается, что электрический ток может производить работу?
2. Как подсчитать количество тепла, выделяемого в проводнике при прохождении по нему тока?
3. Что такое джоуль?
4. Как пишется формула, применяемая для вычисления электрической мощности?
5. Какими единицами измеряется электрическая мощность?
6. Какими единицами измеряется электрическая энергия?
7. Какое соотношение существует между электрическими единицами мощности и энергии и механическими и тепловыми единицами?

8. Какие обозначения электрических величин и единиц применяются в электротехнике?

9. Что такое полная и полезная мощность динамомашины электродвигателя?

10. Что такое коэффициент полезного действия или отдача динамо машины, электродвигателя, линии?

11. Привести численные примеры на вопросы 9 и 11.

§ 29. Магнетизм и электромагнетизм.

Свойства магнитов и магнитные действия электрического тока бывают известны обыкновенно из отдела физики — электричество и магнетизм. Так как вместе с тем магниты и особенно электромагниты находят большое применение на практике, то для лучшего уяснения их действий в различных описываемых в дальнейшем случаях необходимо с некоторыми свойствами магнитов и электромагнитов ознакомиться подробнее.

Магниты обладают свойством притягивать железо, сталь и некоторые другие металлы. Таким же свойством обладают катушки из изолированного (окружонного не проводящей тока оболочкой) проводника (соленоиды) при прохождении по ним тока, а особенно катушки, снабженные железным сердечником. Эти стержни, превращающиеся в магниты при прохождении тока по проводам катушки, называются *электромагнитами*.

Человек редко пользуется так называемыми «естественными» магнитами, добываемыми из руды, и прибегает на практике к более сильным «искусственным» магнитам, изготовляемым из специальных сортов стали в форме подковы, круглого или четырехугольного стержня или в виде стрелки (например, в компасе). Для изготовления магнитов, поперечные размеры которых по сравнению с длиною незначительны, применяется вольфрамовая и реже — хромовая сталь, для изготовления коротких магнитов с большим поперечным сечением применяется кобальтовая сталь. Примерные составы некоторых магнитных сортов стали следующие:

Сталь немецкая: углерода — 0,57%, вольфрама — 5,47%, кремния — 0,16%, марганца — 0,26%.

Сталь шведская: углерода — 0,7%, вольфрама — 5,15%, кремния — 0,48%, марганца — 0,33%.

Сталь русская федосеевская: углерода — 0,8%, хрома — 5%, вольфрама — 1,11%.

Сталь японская: углерода — 0,3% — 2%, кобальта — 35%, с примесью хрома молибдена или вольфрама.

Остальная часть стали — кроме указанных выше металлов — есть железо.

Магниты, изготовляемые из других сортов стали, например,

инструментальной, не будут отличаться ни силой ни постоянством.[1] Свою притягательную силу магниты проявляют в наибольшей степени у концевых частей. Те части магнита, которые обладают наибольшей притягательной силой, называются его полюсами. В середине магнита притяжения не происходит, почему она называется нейтральной линией. Металлические полоски, бруски и т. д., которые в отдельных приборах притягиваются магнитами или электромагнитами, называются якорями.

Полюсы двух отдельных магнитов взаимодействуют между собою: одноименные (северные или южные) взаимно отталкиваются, разноименные (северный и южный) взаимно притягиваются. Сила такого взаимодействия определяется, согласно закону Кулона, по формуле:

$$P = \frac{m_1 m_2}{r^2} \text{ дин}, \quad (29)$$

в которой m_1 и m_2 суть магнитные массы, сосредоточенные в полюсах (место наиболее сильного действия магнита) и r — расстояние между магнитами в сантиметрах. Если в этой формуле примем $m_1 = m_2 = 1$ и $r = 1$ см, то и $P = 1$ дине ($\frac{1}{981}$ г). Так как в данном случае взаимодействуют магнитные массы, равные единице, то мы можем дать им такое определение: *за единицу магнитной массы* принимают такое количество магнетизма, которое действует на другое, равное ему, при расстоянии между ними в 1 см с силою в 1 дину.

Магнитная масса свою притягательную силу проявляет, следовательно, в окружающем ее пространстве. Направление этой силы в любой точке пространства, в котором проявляется действие магнитной массы или, как говорят, в любой точке магнитного поля, можно определить по направлению магнитной стрелки, помещаемой в поле магнита. Железные опилки, помещенные в магнитном поле, также дают картину направления действия магнитного поля и притом более полную — в виде линий, которые таким образом дают нам изображение невидимых магнитных силовых линий (магнитный спектр). Для определения (совершенно условного) числа этих силовых линий поступают так. Описывают вокруг магнитной массы, равной единице (рис. 22), шар радиусом в 1 см, поверхность которого равна, как известно из геометрии

$$4\pi r^2 = 4\pi \cdot 1^2 = 4\pi \text{ кв. см},$$

[1] Сверх того процесс изготовления постоянных магнитов требует определенных навыков без которых даже при надлежащем материале не получить хороших, сильных и постоянных магнитов

и принимают, что при магнитной массе в единицу через каждый квадратный сантиметр такого шара проходит одна силовая линия, а всего (во все стороны шара) силовых линий от единицы магнитной массы столько, сколько квадр. сантиметров в поверхности шара, т. е. 4π силовых линий. В таком случае магнитная масса в m единиц даст силовых линий, очевидно, в m раз больше или, как говорят, ее силовой поток будет:

$$\Phi = 4\pi m \text{ силовых линий.} \qquad (30)$$

Если мы опишем вокруг магнитной массы шар радиусом не в один, а в r см и, значит, с поверхностью $4\pi r^2$ см, то на каждый квадратный сантиметр поверхности этого шара придется:

$$P = \frac{\Phi}{4\pi r^2} \quad \frac{4\pi m}{4\pi r^2} = \frac{m}{r^2} \text{ силовых линий.}$$

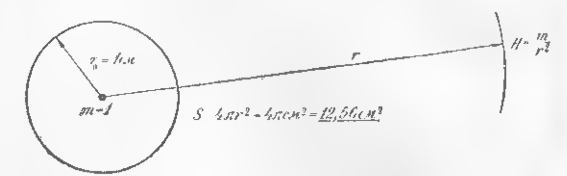


Рис. 22

Это число силовых линий совпадает с величиной напряжения магнитного поля или той силой, в динах, с которой данная магнитная масса m в данном месте магнитного поля действует на другую магнитную массу, равную единице. В самом деле, поместив в какой-нибудь точке поля, создаваемого магнитной массой в m единиц, единицу магнитной массы, при расстоянии между этими массами в r см получим силу взаимодействия между ними, согласно закону Кулона [формула (29)]:

$$H = P = \frac{m \cdot 1}{r^2} = \frac{m}{r^2} \text{ дин.} \qquad (31)$$

Таким образом, если в какой-либо точке магнитного поля единица магнитной массы подвергается действию притяжения или отталкивания от магнитной массы, создающей это поле, с силою в 120 дин, то, значит, в данном месте поля через 1 кв. см проходит 120 силовых линий, и в то же время напряжение поля равно 120.

Как постоянные магниты, так и соленоиды и электромагниты дают *магнитный поток*, определяемый количеством силовых линий (для постоянного магнита $\Phi = 4\pi m$). Магнитный поток, создаваемый соленоидом или электромагнитом, определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{X}{S} = \frac{0{,}4\pi IN}{S}, \qquad (32)$$

где означают: I — силу тока в приборе, N — число витков катушки соленоида или электромагнита, S — сопротивление пути силовых линий (магнитной цепи). По аналогии с законом Ома (см. § 5) можно сказать: *величина магнитного потока Φ прямо-пропорциональна магнитодвижущей силе X и обратно пропорциональна магнитному сопротивлению S.*

Магнитный поток, создаваемый соленоидом, идет через воздух. Если сечение соленоида — Q и выходящий из него поток — Φ, то число силовых линий на 1 кв. см или напряжение поля составит:

$$H = \frac{\Phi}{Q}. \qquad (33)$$

Соленоид с железным сердечником (электромагнит) даст более сильный магнитный поток и более сильное магнитное поле (при той же силе тока). Если мы в этом случае опять будем величину магнитного потока Φ делить на сечение сердечника электромагнита в Q см, то получим, следовательно, большую величину:

$$B = \frac{\Phi}{Q}, \qquad (34)$$

которая называется плотностью магнитного потока или *магнитной индукцией.* Бо́льшая величина получилась от того, что железо сердечника для силовых линий представляет меньшее сопротивление чем воздух или обладает бо́льшей проницаемостью чем воздух. Отношение магнитной индукции B к напряжению магнитного поля H называют *магнитной проницаемостью* и обозначают буквой μ. Эти три величины связаны между собой такой зависимостью:

$$\mu = \frac{B}{H}. \qquad (35)$$

В формуле (32) закона Ома для магнитной цепи величина магнитного сопротивления S зависит от длины пути силовых

линий l, сечения его Q в квадр. сантиметрах и свойства среды, характеризуемой ее магнитной проницаемостью μ, т. е.

$$S = \frac{l}{\mu Q}.$$

Для воздуха $\mu = 1$, для железа, стали, чугуна μ может иметь различные значения, меняющиеся для одного и того же металла в зависимости от изменения напряжения магнитного поля. Если магнитные силовые линии идут последовательно через железо, чугун и воздух, то сопротивление отдельных частей пути должно быть подсчитано особо, и тогда формула для данного случая примет такой вид:

$$S = \frac{l_1}{\mu_1 Q_1} \text{ (железо)} + \frac{l_2}{\mu_2 Q_2} \text{ (чугун)} + \frac{l_3}{\mu_3 Q_3} \text{ (воздух)}. \quad (36)$$

Так как значения μ для железа, стали, чугуна достигают величин порядка нескольких тысяч, то сопротивление их по сравнению с воздухом, для которого $\mu = 1$, будет незначительно, и магнитный поток при той же магнитодвижущей силе будет значительно больше, или тот же магнитный поток можно будет получить с меньшей затратой силы тока, чем при воздушной магнитной цепи. Это обстоятельство должно уяснить нам, почему в отдельных приборах воздушные промежутки, проводящие магнитный поток, стараются свести до самых малых размеров. Так, например, в электрических машинах воздушный промежуток между вращающейся и неподвижной частью, или так называемое междужелезное пространство, сводится к одному или нескольким миллиметрам. Существенным способом усиления действия магнита и электромагнита является также использование обоих его полюсов, так как два полюса вместе будут иметь притягательную силу в два раза бóльшую, чем один. Если магнитная индукция электромагнита — B, сечение магнитопровода (например, полюса) — Q, то подъемная сила электромагнита:
при действии одним полюсом

$$P = \frac{B^2 \cdot Q}{8\pi \cdot 981000} \text{ кг}, \quad (37)$$

при действии обоими полюсами (подковообразный электромагнит)

$$P = 2\,\frac{B^2\, Q}{8\pi \cdot 981000} \text{ кг}. \quad (38)$$

§ 30. Задачи.

1. Определить число силовых линий, даваемых магнитной массой в единицу ($m = 1$) на расстоянии от нее в $r = 4$ см.
По формуле (31):

$$P = \frac{m}{r^2} = \frac{1}{4^2} = \frac{1}{16} \text{ сил. лин. (на 1 кв. см)}$$

2. Определить силу взаимодействия двух магнитных масс в 30 и 25 единиц при расстоянии между ними в 5 см.
По формуле (29):

$$P = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = \frac{30 \cdot 25}{5^2} = 30 \text{ дин}.$$

3. Постоянный стержневый магнит дает поток в 6280 силовых линий. Определить магнитную массу каждого полюса.
Из формулы (30) имеем:

$$m = \frac{\Phi}{4\pi} = \frac{6280}{4 \cdot 3,14} = 500 \text{ единиц}.$$

4. Сопротивление магнитной цепи равно 0,004, число ампер-витков составляет 1000. Определить силовой поток.
Так как $S = 0{,}004$, $I \cdot N = 1000$, то по формуле (32) имеем:

$$\Phi = \frac{0{,}4\pi \; I \cdot N}{S} = \frac{0{,}4 \cdot 3{,}14 \cdot 1000}{0{,}004} = 314\,000.$$

5. Определить напряжение магнитного поля в расстоянии 4 см от магнитной массы в 32 единицы.
По формуле (32):

$$H = \frac{m}{r^2} = \frac{32}{4^2} = 2 \text{ дины}$$

6. Соленоид, сечением в 8 кв. см, дает 200 силовых линий. Определить напряжение магнитного поля в соленоиде.
По формуле (33):

$$H = \frac{\Phi}{Q} = \frac{200}{8} = 25.$$

7. Соленоид задачи 6, будучи снабжен железным сердечником, дал магнитный поток в 24 000 силовых линий. Определить магнитную индукцию и магнитную проницаемость сердечника.
По формуле (34):

$$B = \frac{\Phi}{Q} = \frac{24\,000}{8} = 3000.$$

По формуле (35):

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{3000}{25} = 120.$$

8. Через сердечник подковообразного электромагнита проходит магнитный поток в 28 000 силовых линий. Определить сечение сердечника, если магнитная индукция $B = 7000$.

*

Согласно формуле (34) находим

$$Q = \Phi : B = 28\,000 : 7000 = 4 \text{ кв. см.}$$

9. Определить силу притяжения якоря стержневым электромагнитом, у которого сердечник электромагнита $Q = 9,81$ кв. см и магнитная индукция $B = 2512$.

По формуле (37) определяем:

$$P = \frac{B^2 Q}{8\pi \cdot 981\,000} = \frac{2512^2 \cdot 9,81}{8\pi \cdot 981\,000} = 2,512 \text{ кг.}$$

§ 31. Вопросы для повторения.

1. Что такое постоянный магнит, соленоид и электромагнит?
2. Из какого материала изготовляются постоянные магниты?
3. Какое взаимодействие существует между магнитными массами?
4. Какую магнитную массу принимают за единицу?
5. Что такое магнитный поток, напряжение магнитного поля, магнитная индукция, магнитная проницаемость, магнитное сопротивление?
6. Как выражается закон Ома для магнитной цепи?
7. Как вычисляется подъемная сила электромагнита?

§ 32. Получение тока в электрических машинах.

Действие генератора электрического тока, т. е. машины, превращающей механическую энергию в электрическую, основано на явлении, открытом в 1831 году английским физиком Фарадеем (1791—1867 г.). Явление это заключается в том, что в проводнике, перерезывающем при своем движении магнитные силовые линии, возникает или, как говорят, *индуктируется* электродвижущая сила, которая может дать ток, если проводник замкнут. Представим себе проводник AB, движущийся в магнитном потоке, создаваемом полюсами N и S, в направлении, указанном стрелками c (рис. 23). Направление индуктируемой в проводнике э.д.с. можно определить *по следующему правилу правой руки.*

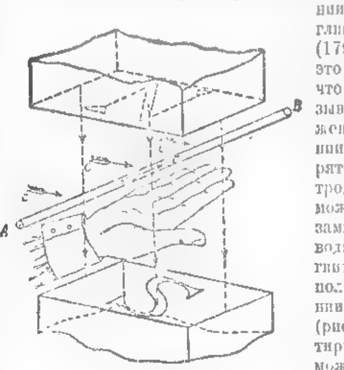


Рис. 23.

Поместим правую руку на проводник так, чтобы силовой поток входил в ладонь и большой палец показывал направление движения

проводника; тогда остальные четыре пальца покажут направление электродвижущей силы, отмеченное на чертеже стрелкой E. Если мы будем смотреть на проводник со стороны A, то увидим хвост стрелки, означающий, что ток идет от нас; будем в таком случае ставить на проводнике крестик. В другом конце проводника — со стороны B мы увидим острие стрелки, и сообразно с этим знаком точка будет обозначать случаи, когда ток идет на нас.

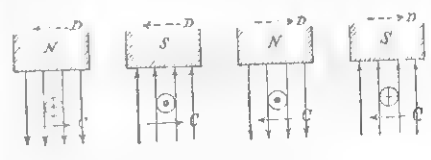


Рис. 24.

На рис. 24 рассматриваются 4 случая движения проводника в магнитном поле в направлении стрелки C.

Направление индуктированной э.д.с. в проводнике обозначено на чертеже принятыми нами условными знаками. Читателю рекомендуется проверить свое умение пользоваться правилом правой руки (ладони).

Существует не менее распространенное *правило трех пальцев* (правой руки), предложенное Флеммингом. Согласно этому правилу, большой, указательный и средний пальцы правой руки располагают так, чтобы указательный палец давал направление магнитного потока, а большой палец указывал направление движения проводника; тогда средний палец покажет направление индуктированной электродвижущей силы. На рис. 25 дано изображение руки, пользуясь которым читатель может применить правило трех пальцев к случаям, представленным на рис. 23 и 24

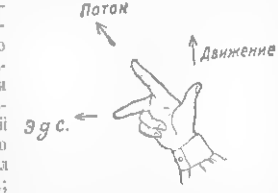


Рис. 25.

Мы с своей стороны считаем первое правило более удобным и легким.

Явление электромагнитной индукции, что весьма важно, будет иметь место и в этом случае, когда проводник неподвижен, а перемещается магнитный поток, или когда проводник и поток не

перемещаются, но последний изменяется по величине и направлению.

Для случая перемещения магнитного поля воспользуемся рис. 24, где стрелка D показывает требуемое для нас перемещение магнитного потока. Правило правой руки может быть применено и здесь, если мы предположим, что магнитный поток неподвижен, а проводник имеет перемещение в направлении, противоположном стрелке D, иначе говоря — по стрелке C, так как перемещение проводника и потока друг относительно друга от этого не изменится. Или же, считаясь с движением магнитного потока, применим *правило левой руки*, при чем большой палец будет указывать направление движения проводника, а четыре пальца — направление электродвижущей силы, если мы попрежнему направим силовой поток из полюсов в ладонь. Мы видим,

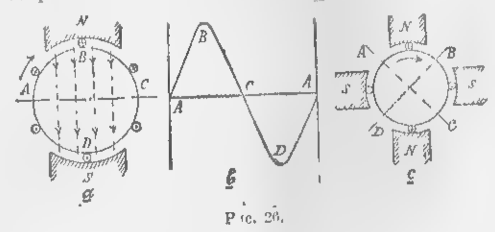


Рис. 26.

что одно и то же правило только разных рук, дает направление э.д.с.

Нетрудно убедиться в том, что для случая движения магнитного поля можно воспользоваться и правилом трех пальцев, но в этом случае придется только вместо правой руки брать левую.

Для получения тока в электрической машине приходится давать проводнику движение по окружности. Тогда, двигаясь по дуге ABC (рис. 26a), проводник будет иметь направление э.д.с. от нас; двигаясь же затем по дуге CDA, проводник переменит направление э.д.с. и, следовательно, тока, если машина дает таковой. Таким образом динамомашина дает переменный ток. Кроме того, двигаясь с равномерною скоростью непосредственно под полюсами, проводник при своем движении будет пересекаться или сцепляться с бо́льшим количеством силовых линий, чем в стороне линии AC, почему и величина э.д.с. будет в первом случае больше. В точках A и C проводник совершенно не будет пересекать силовых линий, и потому, в моменты прохождения

через эти точки, э.д.с. в проводнике будет равняться нулю. Таким образом машина будет давать э.д.с. и ток, *переменные по величине и направлению*. Эти изменения графически можно изобразить кривой (рис. 26b). Из него мы видим, что при прохождении проводника через нейтральную линию ACA э.д.с. равна 0, в точках B и D она имеет максимальное (наибольшее) значение. За один оборот проводник выполняет весь ряд изменений, показанный на рисунке и называемый *периодом*, который повторяется с каждым новым оборотом машины. Если машина делает в минуту n оборотов, то и периодов этих будет n, а за одну секунду $\frac{n}{60}$. На рис. 26c изображена машина с 4 полюсами — двумя северными (N) и двумя южными (S), и потому по дуге ABC э.д.с. даст один полный период изменения и по дуге CDA — второй период. Следовательно, если мы раньше при одной паре полюсов имели за один оборот один период, то теперь при двух парах полюсов имеем за один оборот два периода; при p парах полюсов, очевидно, периодов будет в p раз больше. Таким образом число периодов в секунду будет прямо-пропорционально числу пар полюсов машины и числу оборотов машины за это время. Обозначив число периодов буквой f, можем написать:

$$f = \frac{p \cdot n}{60}. \tag{39}$$

Для образования магнитного поля применяются обычно электромагниты, т. е. искусственные магниты, в которых по обмотке тела магнита проходит ток, получаемый или от особого источника извне, или представляющий собою часть тока машины (см. также §§ 42 и 45).

Одна и та же машина с вращающимся якорем может дать *переменный* или *постоянный ток* в зависимости от того, какое она имеет приспособление для вывода тока из движущихся проводников во внешнюю цепь: *контактные кольца* или *коллектор*. Представим себе вместо отдельного проводника виток AB, разрезанный в одном месте (рис. 27a) и свободными концами присоединенный к двум кольцам, расположенным на той же оси, вокруг которой вращается виток, при чем кольца эти заизолируем друг от друга и от оси. Наложим на кольца по пружинящей металлической полоске (называемой щеткой, так как часто эта полоска делается в виде металлической щетки). Эти щетки неподвижно закрепляются и изолируются одна от другой; затем мы соединим эти щетки проводниками с приемником внешней цепи R. При вращении проводника в магнитном поле в нем будет индуктироваться э.д.с., которая будет создавать переменный

ток в цепи, состоящей из витка AB, колец K и внешней цепи. В качестве полосок, снимающих ток, применяют угли в медных держалках, каковые называются угольными щетками.

Согласно описанному принципу работают лишь некоторые машины переменного тока.

Для получения от машины постоянного тока вместо колец применяют *коллектор*. На рис. 27*b* кольца заменены двумя изолированными друг от друга полукольцами, к которым и присоединены свободные концы витка AB. Когда плоскость витка совпадает с нейтральной линией, другими словами, когда проводники A и B проходят через нейтральную линию CD и индуктируемая в них э.д.с. равна нулю, щетки касаются изолирующих прокладок между полукольцами. При дальнейшем вращении витка

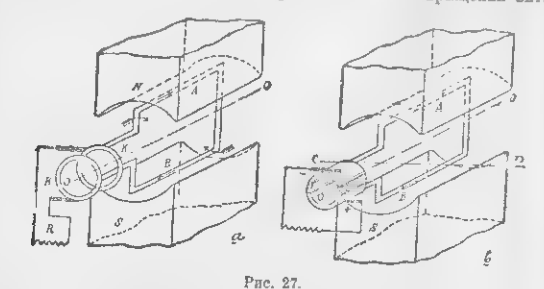


Рис. 27.

проводник A попадает под северный полюс, проводник B под южный полюс. Применяя правило правой руки, мы видим, что ток будет выходить из нижней щетки (знак плюс) и возвращаться в машину через верхнюю щетку (знак минус). При поступлении проводника A под южный полюс направление тока в нем изменится, и он будет давать ток уже к нижней щетке, которая отмечена знаком плюс, что и требуется. Таким образом в момент, когда э.д.с. в проводнике меняет свое направление, происходит соответствующий переход щеток с одного полукольца на другое, почему во внешнюю цепь идет ток, хотя и переменный по величине, но постоянный по направлению. Для того чтобы получить постоянный ток и по величине, применяют не один виток, а много витков и соответственно этому берут коллектор не из двух полуколец, а из большего числа пластин. Для примера возьмем машину с витками *1-2 3-4*, соединенными с коллекторными пластинами

a, *b*, *c* и *d*. При вращении витков в магнитном поле по часовой стрелке в них будут индуктироваться э.д.с. согласно схемам *I*, *II*, *III* и *IV* рис. 28, взятым для одного оборота машины, и применительно к кривым *A* — для витков *1 — 3*, *B* — для витков *2 — 4*. Эти кривые на схеме *V* наложены одна на другую и просуммированы в кривую *C*, которая показывает изменение э.д.с. у щеток. Это изменение при четырех витках меньше, чем при

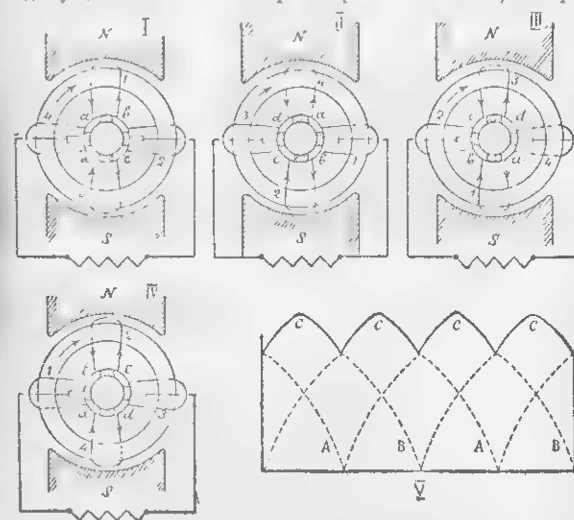


Рис. 28.

одном. Если взять число витков еще больше, то колебания (пульсации) э.д.с. и тока будут еще меньше, и тогда эти величины практически можно будет считать уже постоянными не только по величине, но и по направлению. Значит, машина будет давать во внешней цепи ток, тем более близкий к постоянному, чем больше взято витков и коллекторных пластин.

Чтобы иметь представление о том, какое число проводников на якоре, участвующих в получении э.д.с., и какое число кол-

лекторных пластин может иметь машина, ниже в таблице XI собраны соответствующие данные по различного рода машинам постоянного тока. Машины переменного тока строятся с большим числом проводников. Любая из машин, помещенных в таблице, может быть генератором переменного тока, если только ее коллектор заменить двумя контактными кольцами. Впрочем, следует отметить, что напряжение машины в этом случае будет составлять только 0,707 от указанного в таблице, а число периодов, определяемое по формуле (39), может не соответствовать принятым на практике. Так как вопросу о напряжениях, а также о числе периодов будет посвящен § 34, то здесь о них более говорить не будем.

Та часть машины, в которой получается ток, называется

Таблица XI

Мощность (киловатты)	Число оборотов в минуту	Величина э.д.с. (вольты)	Число проводов в якоре	Число коллект. пластин	Число пар полюсов
4,5	1500	110	[illegible]	92	1
100	150	115	360	180	3
337	300	2250	760	570	3
500	100	500	1352	676	6
500	90	550	1800	900	5
1320	95	145	1152	576	9
2000	107	550	2520	1260	14

якорем. Индуктируемая в нем э.д.с., измеряемая вольтами, прямо пропорциональна: 1) тому магнитному потоку, с которым сцепляется (или пересекает) проводник якоря при своем перемещении, 2) скорости перемещения по окружности якоря (или числу оборотов) и 3) числу проводников, уложенных в якоре.

За единицу э.д.с. (см. также § 5) принимают такую, которая индуктируется в проводнике длиною в один сантиметр, пересекающем в 1 секунду 1 силовую линию магнитного потока. Эта так называемая *абсолютная единица* э.д.с. в 10^8 раз меньше принимаемой на практике и называемой вольтом. Из самого определения э.д.с. видно, что чем больше скорость движения проводника, тем больше пересечет он силовых линий

данного магнитного потока за единицу времени и тем больше будет его э.д.с. Равным образом, чем больше силовых линий в магнитном потоке, тем большее их количество пересечет проводник за единицу времени, и опять тем больше будет величина э.д.с. Наконец, если наши рассуждения отнести не к 1 см проводника, а к длине l, то э.д.с. опять соответственно увеличится. Так как якорь машины — определенной длины, то на величину э.д.с. можно, следовательно, влиять, меняя число проводников, уложенных на якоре.

Все наши рассуждения в равной мере будут правильны, если в машине якорь будет неподвижен, а вращаться будут полюса. В этом случае, конечно, к якорю уже не нужно будет пристраивать токоотводящего устройства, так как вывести концы проводов от якоря можно без всяких контактных колец. Но вместе с тем к якорю, следовательно, нельзя уже приспособить коллектор, и потому машина с вращающейся магнитной системой может давать только переменный ток. Существующие на практике генераторы переменного тока в огромном своем числе будут именно генераторы с неподвижным якорем.

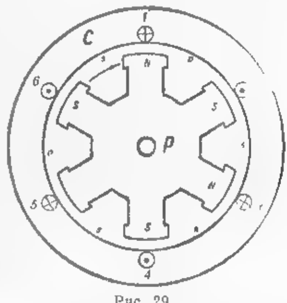


Рис. 29.

Генератор переменного тока с неподвижной обмоткой якоря и вращающимися полюсами представлен на рис. 29. Здесь мы видим станину C, на которой помещен якорь с проводниками $1 - 6$ и которую обычно называют *статором*, роторное вращающееся колесо P с полюсами N и S, обмотки которых, на рисунке не показанные, питаются постоянным током, отчего всегда сохраняют свою полярность. Постоянный ток дается от особой машины. Направление электродвижущих сил в проводниках якоря можно определить по правилу левой руки. У северных полюсов это направление будет «от нас» (знак креста), у южных полюсов — «на нас» (знак точки). Как проводники соединяются между собою, чтобы их э.д.с. складывались, будет сказано в § 45. Пока под каким-нибудь проводником пробегает полюс, его электродвижущая сила постепенно растет и затем так же постепенно уменьшается с тем, чтобы затем под другим уже полюсом снова проделать такие же изменения, но в другом направлении. Таким

образом прохождение под проводником пары полюсов дает один период изменения электродвижущей силы, при чем характер изменения будет синусоидальный (по применяемой в тригонометрии кривой синусоиде), как это показано на рис. 26*а*. Число периодов, какое дает машина за одну секунду, в данном случае определяется по формуле (39). При прохождении тока по обмотке якоря последний намагничивается. Как располагаются на нем полюса для случая рис. 29, на этом рисунке показано. О значении этого намагничивания будет сказано в § 44.

Для вращения якоря или полюсов машины необходима затрата механической энергии, той самой, которую генератор превращает в электрическую энергию тока. Для получения механической энергии служат паровые машины, турбины (паровые и гидравлические) и двигатели внутреннего сгорания, движение которых передается на вал электрической машины. В отдельных случаях применяются ветряные двигатели.

Рис. 30.

Рассмотрим теперь третий способ получения тока, упомянутый нами в настоящем параграфе, когда проводник и магнитный поток не перемещаются, но последний меняется по величине и направлению. Представим себе два проводника (рис. 30 *а*), на протяжении AB находящиеся на близком расстоянии друг от друга. При достаточной их длине или при достаточно большой силе тока, проходящего в первом проводнике от элемента $Э$ мы можем отметить следующее явление. При включении рубильника P ток по верхнему проводнику, возрастая от нуля до некоторой величины, определяемой согласно закону Ома, вызовет образование около себя магнитного потока, также возрастающего от нуля до своего предельного значения. Этот возрастающий поток будет пересекать нижний проводник, и в нем возникнет э.д.с., дающая ток в направлении сплошной стрелки m; наличие тока обнаруживается показанием особого прибора — гальванометра $Г$. При установившемся токе и магнитном потоке, пересечения нижнего проводника силовыми линиями уже не будет, и потому стрелка гальванометра будет стоять на нуле. Как только мы выключим ток в первой цепи и он быстро упадет от своего максимального значения до нуля, такое же и одновременное изменение получит магнитный поток, создаваемый этим током вокруг верхнего проводника AB. Вновь будет иметь место пересечение силовыми

линиями нижнего проводника AB, и в нем вновь возникнет э.д.с., но уже в направлении, указанном пунктирной стрелкой n. Таким образом переменный магнитный поток вызывает образование в проводнике переменной же э.д.с., при чем направление ее обусловливается характером изменения магнитного потока. На этом принципе основано устройство специальных аппаратов, называемых *индукционными катушками* или *катушками Румкорфа*. Перерыв тока производится в них автоматически специальным прерывателем. И здесь три обстоятельства будут влиять на величину э.д.с., индуктируемой во вторичной цепи (на рис. 30*а* в нижнем проводнике). Во-первых, большой магнитный поток даст пересечение проводника с бо́льшим количеством силовых линий и соответственно бо́льшую э.д.с. Быстрота включения и выключения тока в первичной цепи (с батарей элементов) определит то количество силовых линий, которые пересекут проводник в единицу времени. Эта быстрота изменения магнитного потока, равноценная в прежних рассматриваемых нами случаях скорости перемещения проводника или магнитного потока, будет вторым обстоятельством, влияющим на величину э.д.с. во вторичной цепи. Наконец, как и прежде, длина проводника также играет крупную роль. И здесь, как и в машинах, провод берут в виде витков, при чем, как увидим далее, такое расположение сказывается весьма благоприятно в смысле увеличения э.д.с.

К числу электрических машин электротехники относят обыкновенно и так называемые *трансформаторы*, не обладающие движущимися частями. В них э.д.с. получается путем изменения магнитного потока. Сущность действия трансформатора можно уяснить себе при помощи рис. 30*b*. Если мы в обмотку I дадим переменный ток, то таковой, меняясь по величине и по направлению, в железном кольце K даст таким же образом меняющийся магнитный поток, силовые линии которого, пересекая витки обмотки II, возбудят в ней э.д.с. Между напряжениями E_1 и E_2 и числом витков W_1 и W_2 обеих обмоток трансформаторов существует простая зависимость:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = k, \qquad (40)$$

при чем число k называется *коэффициентом трансформации*.

При помощи трансформаторов можно повышать или понижать напряжение в цепях переменного тока. Отдельные задачи § 33 покажут нам, что при передаче определенной мощности на определеное расстояние мы можем, например, уменьшить сечение

проводов в 4 раза, если увеличим напряжение в 2 раза. Получая на станциях электрическую энергию напряжения 110, 220 вольт и т. д. до 12—15 киловольт, мы можем при помощи трансформатора повысить напряжение до 30—200 и более киловольт в зависимости от того, на какое расстояние и какую мощность нам требуется передать. При таком высоком напряжении электрическая энергия передается на далекое расстояние по проводам сравнительно небольшого сечения, что дает значительную экономию в расходах по оборудованию. На местах потребления, опять при помощи трансформатора, давая ток в обмотку с большим количеством витков (W_2 на рис. 30), во второй обмотке (W_1) мы получим низкое напряжение, необходимое для сети, к которой приключены приемники. Только благодаря трансформаторам представилось возможным построить мощные электрические станции у порогов рек, на торфяных разработках, у залежей угля и оттуда передавать дешевую электрическую энергию в любом количестве на сотни километров. О трансформаторах см. также § 51.

§ 33. Задачи.

1. Двухполюсная машина переменного тока делает 3000 оборотов в минуту. Определить число периодов машины.

Так как число пар полюсов $p = 1$, $n = 3000$, то по формуле (39):

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{1 \cdot 3000}{60} = 50 \text{ пер.}$$

2. Какое число оборотов должна делать машина, имеющая 4 полюса, если она дает переменный ток с числом периодов 50 в секунду?

Из формулы (39) имеем:

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ обор.}$$

3. Какого числа периодов переменный ток дала бы машина на 337 киловатт таблицы XI, если ее коллектор заменить двумя кольцами?

По формуле (39):

$$f = \frac{3 \cdot 300}{60} = 15 \text{ пер}$$

4. Первичная обмотка трансформатора имеет напряжение 6000 вольт, вторичная — 125 вольт. Определить коэффициент трансформации.

По формуле (40) находим:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{6000}{125} = 48.$$

5. Определить число витков первичной обмотки трансформатора предыдущей задачи, если вторичная обмотка имеет 90 витков.

Так как коэффициент трансформации нам известен ($k = 48$), то из формулы (40) находим:

$$W_1 = k W_2 = 48 \cdot 90 = 4320$$

6. Требуется передать мощность в в 27,5 килловатта при напряжении в 120 вольт постоянного тока на расстояние в 90 м. Определить, какое для этого потребуется сечение проводов и какое сечение потребуется в том случае, когда ту же мощность и на то же расстояние нужно будет передать при напряжении 240 вольт постоянного тока. Потерю напряжения в обоих случаях взять равной 5%.

Первый случай:

$$27{,}5 \text{ kW} = 27\,500 \text{ W}.$$

Так как по формуле (26) $P = EI$, то:

$$I = \frac{P}{E} = \frac{27\,500}{120} \approx 230 \text{ A}$$

5% от 120 вольт составляет:

$$\frac{120 \cdot 5}{100} = 6 \text{ V}.$$

Сечение провода по формуле (9):

$$q = \frac{230 \cdot 2 \cdot 90}{57 \cdot 6} \approx 120 \text{ кв. мм.}$$

Второй случай.

Сила тока:

$$I = 27\,500 : 240 = 115 \text{ A}.$$

Потеря напряжения:

$$\frac{240 \cdot 5}{100} = 12 \text{ V}.$$

Сечение провода по формуле (9):

$$q = \frac{115 \cdot 2 \cdot 90}{57 \cdot 12} \approx 30 \text{ кв. мм}$$

(ближайшее подходящее сечение 25 или 35 кв. мм).

Сравнивая результаты и уясняя себе, почему сечение провода получилось в 4 раза меньше, мы видим, что в последней формуле для второго случая, вследствие того, что напряжение нами взято в 2 раза больше, входящая множителем в числитель сила тока получается в 2 раза меньше, чем для первого случая, почему результат должен уменьшиться в 2 раза. Кроме того при одном и том же проценте потери напряжения величина таковой для второго случая уже будет в 2 раза больше, а так как эта величина входит в знаменатель формулы, то результат будет еще в 2 раза меньше, а всего в $2^2 = 4$ раза меньше.

Если бы мы такой подсчет для второго случая проделали для напряжения в 360 вольт, то есть в 3 раза большего, то сечение получили бы в $3^2 = 9$ раз меньше. Вообще же при передаче мощности на определенное расстояние, при определенном проценте потери напряжения в линии, повышая напряжение в n раз, мы тем самым уменьшаем сечение провода в n^2 раз.

7. Волховская гидроэлектрическая станция имеет установленную мощность в 56 000 киловатт и передает свою энергию в Ленинград при напряжении в 110 000 вольт по линии длиною 131 км, оборудованной шестью проводами, каждый сечением в 120 кв. мм, т. е. диаметром в 12,38 мм. Определить, какое сечение нужно было бы взять для этих шести проводов, если бы напряжение линии вместо 110 000 вольт было взято только 220 вольт.

Так как напряжение во втором случае в 110 000 : 220 = 478 раз меньше, то, согласно сказанному в предыдущей задаче, сечение каждого провода должно быть в 478² раз больше. Следовательно,

$$q = 120 \cdot 478^2 = 120 \cdot 228\,484 = 27\,418\,080 = 27{,}42 \text{ кв. мм.}$$

Отсюда получаем диаметр провода из формулы $q = \frac{\pi d^2}{4}$:

$$d^2 = \frac{4q}{\pi} \quad \text{и}$$

$$d = \sqrt{\frac{4q}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 27\,418\,080}{3{,}14}} = 5910 \text{ мм} = 5{,}91 \text{ м.}$$

Получилось, что каждый из проводов должен быть диаметром примерно в 6 м. Конечно, передача энергии такими проводами экономически невозможна и технически неосуществима. Отсюда — необходимость устройства линий передачи высокого напряжения.

§ 34. Системы и род токов и напряжения.

Вся прикладная электротехника обычно делится на технику сильных и технику слабых токов. Электрические станции, питающие источники света, электродвигатели и другие приемники и дающие в сеть токи порядка не менее нескольких десятков ампер, считаются обслуживающими установки *сильных токов*. Звонковая и пожарная сигнализации, телефония и телеграфия, железнодорожная сигнализация, зачастую пользующиеся током порядка нескольких миллиампер, относятся к установкам *слабых токов* (или проволочной связи). К ним же обычно относят стоящую обособленно беспроволочную связь, т. е. радиотелеграфию и радиотелефонию или, говоря короче, радиотехнику (беспроволочная связь). Если станции сильных токов растут все более и более по своей мощности, отпуская тем самым и более ампер, то и установки слабых токов часто далеко переступают те границы, которые давали основание говорить о «слабых токах». Так, например, большие телефонные устройства крупных городов совершенно не имеют дела с гальваническими элементами, каковые многие из нас привыкли видеть в телефонных аппаратах у абонентов. Потребная для таких телефонных станций энергия вся целиком получается на телефонной станции от батареи аккумуляторов (см. § 54) или электрических машин. Эти же аккумуляторы и

машины служат источниками тока на крупных телеграфных станциях и по своей мощности вполне могут соперничать с небольшими электрическими блокстанциями, обслуживающими, например, осветительные нужды большого учреждения или завода. Еще солиднее будут устройства для получения электрической энергии на радиостанциях. На ряду с мощностями в 2 киловатта там имеются мощные устройства на 200 киловатт и более.

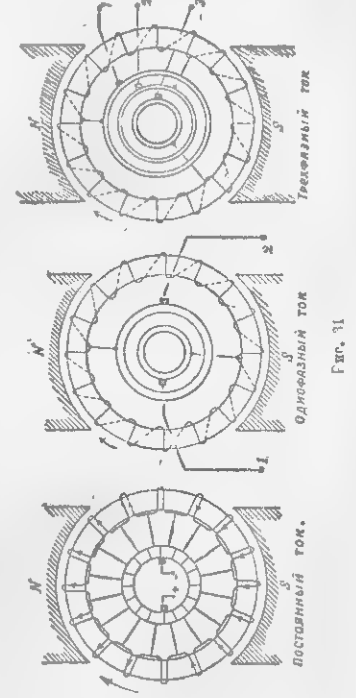


Рис. 31

По роду тока можно говорить о *постоянном* и *переменном токе,* причем последний имеет еще свои подразделения. Если мы гальванический элемент или динамомашину, снабженную коллектором, замкнем на какое-либо сопротивление и не будем его менять, то по цепи все время будет итти ток, постоянный по величине и по направлению. Если мы изменим величину этого сопротивления, то соответственно изменится и ток, оставаясь постоянным по направлению. Таким образом во всех случаях ток при неизменных частях цепи будет постоянным и по величине и по направлению, и изменения тока по величине будут иметь место не вследствие каких-либо особенностей генераторов тока, а исключительно вследствие изменений нагрузки во внешней цепи. Если же мы имеем машину переменного тока, то даже и при постоянном сопротивлении внешней цепи она будет давать ток переменный по величине и направлению (см. рис. 26*b*).

Применяемые на практике переменные токи делятся на *однофазные, двухфазные, трехфазные, шестифазные, девятифазные и двенадцатифазные.* Рассмотренная нами в § 26 (рис. 27*a*) несложная машина (с двумя кольцами) дает во внешнюю цепь однофазный ток и на практике называется динамомашиной или генератором однофазного тока или *однофазным альтернатором.* На рис. 31 даны изображения кольцевых якорей машин постоянного однофазного и трехфазного тока. В последнем случае, мы видим, машина снабжена уже тремя симметрично расположенными кольцами. Работу трехфазного альтернатора

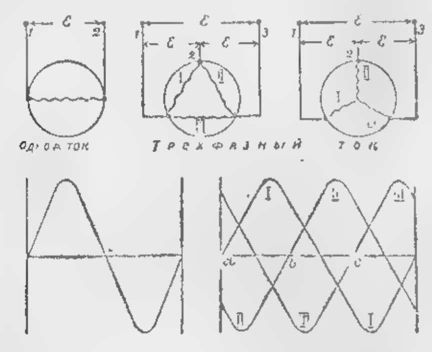


Рис. 32.

можно свести к работе трех однофазных машин, обмотки которых особенным образом расположены на одном и том же якоре.

Однофазный альтернатор с обмоткой якоря, расположенной на статоре, и с вращающимися полюсами представлен на рис. 29, причем проводники якоря оставлены несоединенными между собою. Как в таком случае нужно соединить отдельные проводники, показано на рис. 59, применительно к которому и дан соответствующий текст в § 45. В этом же параграфе дано описание и трехфазных альтернаторов с неподвижной обмоткой якоря.

На рис. 32 представлены схематически: обмотка якоря однофазного альтернатора и под ней — кривая изменения (синусоида) э.д.с. машины; два якоря трехфазного альтернатора, имеющие каждый по три отдельных обмотки, на схеме особо пронумерованные, и под ними кривые изменения э.д.с. в этих

обмотках. Каждая из этих *фазных* обмоток имеет начало и конец, которые смешивать ни в коем случае нельзя. Если начало одной фазы соединить с концом следующей, то получится соединение *треугольником.* Как при этом выводится ток во внешнюю цепь, видно из схемы. Если концы (или начала) всех фаз соединить в одной точке, а из начал (или концов) вывести ток во внешнюю цепь, то получится соединение *звездой.* На диаграмме рис. 32 (внизу справа) взят один законченный период для первой фазы (синусоида). В первый момент в точке *a* э.д.с. 1-й фазы равна нулю, э.д.с. остальных фаз равны и прямо противоположны. Для э.д.с. 2-й фазы подобный момент наступает лишь через одну треть периода (точка *b*) и затем еще через одну треть наступает такой же момент и для третьей фазы (точка *c*). Таким образом фазы разнятся одна от другой на одну треть периода. Если мы спутаем начала и концы и соединим фазы неправильно, то в сети уже не будет трехфазного тока, а будут итти переменные токи, лишенные закономерности, присущей трехфазным токам. Шестифазные, девятифазные и двенадцатифазные токи находят обычно применение лишь на подстанциях, преобразующих трехфазные токи в постоянный, почему здесь мы останавливаться на них не будем, как и на двухфазных токах, которые нашли широкое применение главным образом в Америке.

Переменные синусоидальные э.д.с. дают в цепи переменные же синусоидальные токи. Эти токи приводят во вращение электродвигатели, нагревают волоски лампочек накаливания и заставляют их светиться. И во всех случаях, для какой бы цели их ни использовали, они производят такой механический, или тепловой, или световой и т. д. эффект, как будто в цепи действует постоянная э.д.с. E и постоянный ток I. Измерительные приборы как-раз и показывают эти действующие величины. Если мы максимальные значения э.д.с. и тока обозначим через E_m и I_m, то так называемые действующие (средние) значения напряжения и тока легко получить из следующих формул:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, I_m; \qquad (41)$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, E_m. \qquad (42)$$

При соединении фаз треугольником напряжение цепи будет такое же, как и в фазе, линейный же ток в каждом проводе равен получаемой графическим путем геометрической сумме токов *i* двух фаз, сходящихся в этой точке, а так как эти фазные токи

равны, то их геометрическая сумма даст величину $i\sqrt{3}$. Обозначив линейные или главные величины большими и фазные величины малыми буквами, получим следующие формулы:

$$E = e, \tag{43}$$

$$I = i\sqrt{3} = 1{,}73\, i. \tag{44}$$

При соединении фаз звездою (см. рис. 32) ток, идущий в фазе, пойдет и в соответствующий провод линии; поэтому для их зависимости имеем простое выражение [формула (45)]. Напряжение же линии будет равно так называемой геометрической сумме напряжений двух фаз, а именно $e\sqrt{3}$. Следовательно, для случая соединения фаз звездою существуют такие зависимости:

$$I = i, \tag{45}$$

$$E = e\sqrt{3} = 1{,}73\, e. \tag{46}$$

Большинство электрических станций, вырабатывающих электрическую энергию переменного тока, дает ток при 50 периодах в секунду. Реже встречается 60 и 42,5 периодов. Электрические станции, работающие для трамваев или электрических жел. дорог, имеют число периодов 15 и 25. Применение тока с большим числом периодов в первом случае объясняется тем обстоятельством, что угольные лампы накаливания горят без ощутительного для глаза мигания лишь при числе периодов не менее 25, металлические лампы при периодах выше 25, дуговые же лампы для правильного горения требуют свыше 40 периодов. В тех случаях, когда приемниками являются электромагнитные механизмы (электродвигатели и др. электрические машины, трансформаторы), как это имеет место при электрической тяге, для уменьшения магнитных потерь в электромагнитных механизмах берут уменьшенное число периодов, упомянутое выше. В СССР обыкновенно приходится иметь дело с 50 периодами, принятыми в качестве стандартных. Совершенно обособленно, наконец, стоят альтернаторы радиостанций, вырабатывающие ток с частотой до 1000 периодов и выше; в последнее время стали появляться динамо с частотой до 75 000 периодов в секунду.

То напряжение, с которым нам приходится иметь дело, не выходя из своих квартир (110, 120 и 220 вольт), называется низким напряжением. Согласно нашим правилам и нормам, «к устройствам низкого напряжения относятся те устройства сильных токов, в которых действующее напряжение в местах потребления между каким-либо проводом и землей не превосходит 250 вольт». В области низкого напряжения нет такого разнообразия, как в высоком напряжении, и пределы низкого напряжения, как показывают вышеприведенные цифры, весьма ограничены. Техника же высокого напряжения ушла так далеко, что в настоящее время имеется уже опытное, правда, устройство в один миллион вольт; электропередачи напряжением в 100—150 киловольт никого уже не удивляют, а сети напряжением в 6000—12 000 вольт стали обычным явлением. В силу такого большого размаха следовало бы говорить о низком, повышенном и высоком напряжении, но такого установившегося подразделения пока не существует.

В СССР для передачи и распределения энергии переменными токами в качестве стандартного принят переменный (трехфазный ток) с частотою 50 периодов в секунду. У токоприемников установлены как стандартные, 120, 220 и в отдельных случаях 380 (для электродвигателей) вольт низкого напряжения и 3000, 6000 и 10 000 вольт высокого напряжения. В соответствии с этими величинами и для генераторов трехфазного тока приняты напряжения 220, 3300, 6600 и 11 000 вольт. Для электропередач установлены так же, как стандартные, напряжения 3000—3300, 6000—6600, 10 000—11 000 вольт, 20—22, 35—40, 60—65, 105—115, 150 и 200 киловольт.

§ 35. Задачи.

1. Амперметр, включенный в цепь переменного тока, показывает 20 ампер. Какого максимального значения достигает мгновенная сила тока?

По формуле (41).

$$I_m = I\cdot\sqrt{2} = 20\cdot 1{,}41 = 28{,}2 \text{ A}.$$

2. Какое максимальное значение э.д.с. дает генератор однофазного тока, если вольтметр показывает 6000 вольт?

Согласно формуле (42) имеем:

$$E_m = E\cdot\sqrt{2} = 6000\cdot 1{,}41 = 8460 \text{ V}.$$

3. В трехфазном альтернаторе фазные величины тока и напряжения соответственно равны 100 ампер и 120 вольт. Определить линейные величины, если соединение фаз выполнено треугольником.

По формулам (43) и (44) находим:

$$E = 120 \text{ V}; \qquad I = 100\cdot\sqrt{3} = 173 \text{ A}.$$

4. Приборы, включенные в линию, показывают 79 ампер и 220 вольт. Определить фазные ток и напряжение в машине, если фазы соединены звездою.

Согласно формулам (45) и (46).

$$i = 79 \text{ A}; \qquad e = \frac{E}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} \approx 127 \text{ V}$$

5. Определить какого максимального значения достигают ток и напряжение в машине и в линии для случая предыдущей задачи.

Искомые величины находим по формулам (41) и (42):

в линии $I_m = 79\cdot\sqrt{2} = 111$ A; $E_m = 220\cdot\sqrt{2} \approx 310$ V;

в машине $I_m = 79\cdot\sqrt{2} = 111$ A; $E_m = 127\cdot\sqrt{2} \approx 180$ V.

6. Какой частоты ток получается от двухполюсного генератора трехфазного тока, вращающегося со скоростью 3000 оборотов в минуту?

Согласно формулы (39):

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{1\cdot 3000}{60} = 50 \text{ пер.}$$

7. Сколько полюсов должен иметь генератор, вращающийся со скоростью 100 оборотов в минуту при частоте 50 периодов?

По формуле (39):

$$p = \frac{60\cdot f}{n} = \frac{60\cdot 50}{100} = 30, \text{ откуда } 2p = 2\cdot 30 = 60.$$

8. Какое число оборотов должна делать динамомашина переменного тока, если она дает 50 периодов в секунду и имеет 48 полюсов?

По формуле (39):

$$n = \frac{60\cdot f}{p} = \frac{60\cdot 50}{24} = \frac{3000}{24} = 125.$$

9. Какое число перемен тока и какова продолжительность периода у машины, работающей при частоте, равной 50?

Так как в каждом периоде две перемены тока, то число перемен будет в два раза больше числа периодов. Следовательно, число перемен

$$x = 2\cdot f = 2\cdot 50 = 100.$$

Если в 1 сек. машина делает f периодов, то на 1 период приходится доля секунды, определяемая по формуле:

$$T = \frac{1}{f}.$$

В нашем случае $T = \frac{1}{50} = 0{,}02$ сек.

§ 36. Вопросы для повторения.

1. В чем состоит закон электромагнитной индукции Фарадея?
2. Как определяется направление э.д.силы, индуктируемой в проводнике?
3. Какими тремя способами можно получить индуктированный ток и где каждый из таких способов применяется?
4. Какой ток получается в проводнике динамомашины, постоянный или переменный?
5. В каких динамомашинах и для чего применяется коллектор?

6. От каких величин зависит число периодов машины?
7. Какое значение для получения электродвижущей силы имеет число проводников на якоре машины постоянного тока?
8. На какие основные отделы делится электротехника?
9. Какие токи, известные под общим названием переменных токов, применяются на практике?
10. Как соединяются обмотки якоря трехфазного альтернатора?
11. Какая зависимость между фазным и линейным током и напряжением в трехфазном альтернаторе?
12. Какое напряжение считается низким и какие у нас установлены стандартные величины напряжения?

§ 37. Электродвижущая сила самоиндукции (э.д.с.с.) и взаимоиндукции (э.д.с.в.).

Когда в цепи идет установившийся по величине ток, то кругом провода получается постоянный по величине магнитный поток. Если же мы этот ток будем изменять, например, включением сопротивлений реостата или включением и выключением самой цепи, то с изменениями тока соответственно будет меняться и величина создаваемого им магнитного потока. Из § 32 мы уже знаем, что этот переменный поток, пронизывая проводник посторонней цепи, индуктирует в ней э.д.с. Обратимся снова к рис. 30. Если мы будем поочередно включать и выключать ток от батареи в верхнем контуре (очертании проводников, цепи) левой схемы, то получающийся переменный магнитный поток пересечет не только проводник чужого нижнего контура, но и свой проводник, почему и в этом последнем проводнике возбудится э.д.с. Вот эта э.д.с., индуктируемая меняющимся током (и потоком) в том самом проводнике, по которому идет ток, называется *электродвигающей силой самоиндукции*. Она, следовательно, непременно будет возникать в цепи переменного тока, где ток и магнитный поток все время меняются. А так как присутствие железа усиливает магнитный поток, то э.д.с. самоиндукции при одной и той же силе тока в железном проводе будет больше, чем в медном или бронзовом и алюминиевом, так как в первом случае магнитный поток больше. В катушке с железом она тоже будет больше, чем в катушке без железа, в которой при одной и той же силе тока магнитный поток слабее.

Э.д.с.с., появляясь в цепи, ухудшает условия работы установки. Так, например, если она возникает в телефонном проводе, то она искажает разговор и ослабляет слышимость речи. В проводах большого протяжения действие ее настолько значительно, что применять железные провода для междугородного телефонного сообщения не приходится, и их заменяют бронзо-

выми. Поэтому во многих случаях, например, в технике слабых токов, даже приходится прибегать к приспособлениям, смягчающим вредное действие самоиндукции. Особенно с нею приходится считаться в технике переменных токов. Но и в постоянных токах она дает себя знать, например, в электромагнитных механизмах. Так, в схеме a рис. 10, при выключении цепи электромагнитов M машины рукояткою реостата P, магнитный поток быстро падает до нуля и, сцепляясь с обмоткой полюсов, вызывает в ней образование э.д.с.с. Чем быстрее изменение магнитного потока, тем больше э.д.с.с. Внешняя цепь в это время выключена. Замкнутого контура нет. Э.д.с.с., достигнув большого значения, может пробить изоляцию катушек электромагнитов, и тогда машина выйдет из строя. Во избежание этого холостой контакт O реостата снабжают дополнительным проводником, показанным на схеме пунктиром. При выключении реостата обмотка полюсов этим проводником оказывается замкнутой накоротко, и тем самым для э.д.с.с. находится естественный выход.

Самоиндукция цепи зависит от числа силовых линий, пересекающих проводник. Поэтому самоиндукция линии будет больше самоиндукции участка линии. Пусть на каждый погонный сантиметр линии приходится одна силовая линия магнитного потока. Если мы из провода нашей линии изготовим соленоид так, чтобы на один виток приходилось 5 см провода, то каждый сантиметр этого витка будет сцепляться не с одной силовой линией, а со всеми пятью силовыми линиями. А так как этих витков в соленоиде N, то каждый виток, сцепляясь с силовыми линиями всех витков, даст значительную самоиндукцию. Магнитный поток Ф катушки, составленной из N витков, при прохождении через нее тока может быть определен по формуле (32).

Если в катушку вставить железный сердечник, то, как мы уже знаем, магнитное сопротивление уменьшится (магнитная проницаемость железа выше магнитной проницаемости воздуха), и потому магнитный поток и самоиндукция возрастут еще больше. Влияние железного сердечника на увеличение самоиндукции позволяет приготовлять катушки с переменным коэффициентом самоиндукции, для чего сердечник делается выдвижным. Наибольшая самоиндукция получится тогда, когда сердечник вдвинут в катушку полностью. Для сравнения различных электрических цепей по отношению их способности к самоиндукции, определяют число магнитных силовых линий, которые пересекают данную цепь при силе тока в одну абсолютную единицу (10 ампер). Это число обозначают буквой L и называют *коэффициентом самоиндукции*, при чем за единицу коэффициента самоиндукции считают самоиндукцию такой цепи, в которой при пропускании тока в 1 абсолютную единицу (10 ампер) получается пересечение одной силовой линии с самой цепью. На практике эту единицу, как слишком малую, заменяют другой, в 10^9 (тысячу миллионов) раз большей, называемой *генри* в честь английского ученого Генри, много занимавшегося вопросом о самоиндукции. 1 генри равен 10^9 единиц $CGS = 10^9$ см; тысячная часть генри называется миллигенри и равна 1 миллиону см (10^6 см).

Если цепь представляет собою 1 виток и по нему идет ток в 10 ампер (1 абсол. един.), то ее магнитный поток, на основании формулы (32) равен $\frac{4\pi}{S}$. Но вместе с тем это будет и коэффициент самоиндукции:

$$L = \frac{4\pi}{S}.$$

При N витках магнитный поток увеличится в N раз, почему в последнюю формулу нужно ввести множитель N. А так как магнитные линии будут пересекать не только свой виток, но и остальные, то число силовых линий, пересекающих каждый виток, увеличится вторично в N раз. Поэтому в последнюю формулу необходимо ввести множитель N^2, и тогда она примет такой вид:

$$L = \frac{4\pi N^2}{S}. \tag{47}$$

Как в случае электрической индукции, показанной схемой с проводником AB (рис. 30), так и в случае самоиндукции — при *замыкании* цепи индуктируемая э.д.с. *противоположна* напряжению цепи, а при *размыкании* цепи — имеет то же направление. Поэтому мы, как общее правило, можем установить, что при возрастании силы тока (цепь, например, замыкается) появившийся ток самоиндукции движется противоположно направлению главного тока и как бы тормозит его или, иначе, э.д.с.с., будучи встречной по отношению к напряжению цепи, не дает току сразу возрасти до своей нормальной силы; при уменьшении тока (цепь, например, размыкается) появившийся ток самоиндукции движется в том же направлении, что и главный ток, как бы подталкивая его или, иначе, э.д.с.с., складываясь с уменьшающимся напряжением цепи, дает результирующую э.д.с., замедляющую уменьшение тока. Самостоятельно э.д.с.с. проявляется в случае размыкания в цепи и тогда дает ток, который называется *экстратоком* размыкания. Вследствие этого и получается искра при установке рукоятки реостата (рис. 10a) на холостой

контакт O. Во избежание вредного действия самоиндукции на электромагнит M машины, при выключении обмотки возбуждения, она замыкается на короткое особым проводником, присоединенным к контакту O, что и показано на схеме.

Самоиндукция подобна инерции известной из механики. Как проявляется инерция при трогании предмета с места, при остановке, при быстром изменении скорости, всем хорошо известно. По аналогии самоиндукцию можно назвать *электрической инерцией*. В механике инерция проявляется за счет той энергии, какая имеется в движущемся или находящемся в покое теле. Электрическая инерция возникает за счет магнитной энергии провода, по которому идет ток. Где этой магнитной энергии больше (например, катушка с железным сердечником), там значительнее и проявление инерции. Когда по проводнику идет ток, вокруг него возникает магнитное поле. Чтобы его создать, надо поглотить известное количество электрической энергии. Раз это поле создано, дальнейшего расхода уже не требуется, так как при установившемся токе самоиндукция, как мы уже знаем, себя больше не проявляет. При перерыве тока магнитная энергия возвращается проводу в виде электрической энергии. Так и судно по прекращении работы машины по инерции продолжает свое движение за счет скопленной им живой силы.

Рис. 33.

На рис. 33a мы видим два сообщающихся сосуда. Если в соединяющей их трубе открыть кран, то истечение жидкости не сразу примет свои нормальные размеры, раз только трубка достаточного диаметра. И наоборот, если мы быстро разобщим сосуды с водой, изображенные на рис. 33b, быстро закрыв кран K, вода не израсходует своей энергии на расширение стенок соединительной трубы, а пойдет по трубке T и даст фонтан изливающийся выше уровня жидкости в сосуде A. Подобно этому как и в первом из рассмотренных нами примеров с жидкостями по включении рубильника P (рис. 33c), ток установится не сразу а через некоторый промежуток, почему стрелка прибора (амперметра дойдет до определенного значения, двигаясь с некоторым замедлением.

На рис. 33d представлена схема для опыта Флемминга. В этой схеме батарея аккумуляторов питает катушку L с толстой проволокой, при чем параллельно катушке, как показано на схеме, включена лампа накаливания. Последнюю подбирают таким образом, чтобы при замкнутой цепи она давала только темнокрасный накал. Прерывая цепь внезапно прерывателем P, мы увидим как лампа на короткое мгновение заблестит ярким светом (за счет экстратока размыкания от катушки L). От электрической инерции (самоиндукции) легко избавиться, если катушку обмотать, сложив провод вдвое, как это показано на рис 33e. Тогда в обеих половинах провода пойдут токи разного направления, и потому создаваемые ими магнитные потоки, как равные и противоположные, будут взаимно уравновешиваться, отчего никакой самоиндукции не получится. Но тогда вообще не будет никакого потока, и прибор уже не будет электромагнитом. Следовательно, в приборах и механизмах, которые по самой сути своей должны быть электромагнитными, так (*бифилярно* — по-русски в две нитки) выполнять обмотку нельзя.

Самоиндукция проявляется в каждом проводе при всяком изменении в нем тока. Чем быстрее и значительнее эти изменения, тем больше и самоиндукция. При непрерывных изменениях тока, как это имеет место при переменном токе, мы имеем непрерывное проявление самоиндукции. При одной и той же силе тока железный провод даст более сильный магнитный поток, чем медный и бронзовый. Поэтому самоиндукция в железном проводе будет сильнее. Все электромагнитные механизмы, машины с их обмотками на железном якоре или на полюсных сердечниках, электромагнитные тормозы и т. д обладают значительной самоиндукцией. Линии передачи при их значительных протяжениях и больших силах тока также имеют большую самоиндукцию.

Кроме таких самоиндукций, которые возникают по самой природе того или другого электротехнического устройства, часто приходится еще создавать искусственную самоиндукцию. Так, например, при вводе линии передачи на подстанцию, а равно при выводе ее со станции устанавливают индукционные катушки или дроссели, образцом которых может служить катушка, представленная на рис. 34. Индукционные или реактивные катушки

(реакторы) включают также в распределительное устройство станций или подстанций в целях ограничения токов короткого замыкания. Такие катушки, как и предыдущая, делаются из голого медного провода и не имеют железного сердечника. Представленный на рис. 35 реактор имеет восемь рядов спиралей и в каждой спирали по несколько витков. Вся токопроводящая система имеет солидное крепление. Без самоиндукции не обходится ни одно радиоприемное устройство. Образец сотовой катушки самоиндукции для этого случая приведен на рис. 36.

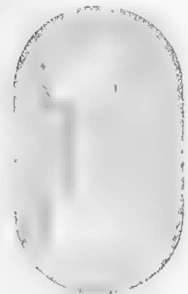


Рис. 34

Как включаются в сеть самоиндукции (рис. 34) реакторы (рис. 35), показано на рис. 37, причем для упрощения схем все линии показаны в один провод. На рис. 37*а* трансформатор соединен с шинами *Ш* проводом *ПТ*. От этих же шин имеется ответвление в одну из линий передач. Ток идет в линию *П* через индукционную катушку *L*. Эта катушка рабочему переменному току с обычным числом периодов, равным 50, не оказывает большого сопротивления. Если же с линии поступит на подстанцию (в обратном направлении) ток, возникший как следствие грозового влияния и имеющий большое число периодов, катушка окажет ему большое сопротивление, и грозовой разряд уйдет в землю через роговой разрядник *PP*, воздушный промежуток в котором представляет большое сопротивление обычным рабочим токам данной сети.

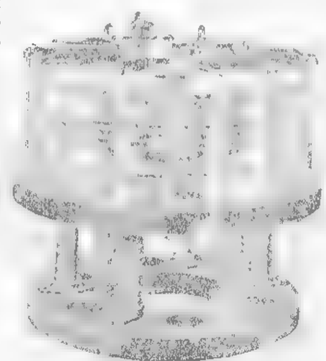


Рис. 35

На рис. 37*б* показаны: *I*—*IX* — линии передачи, *MB* масляные выключатели, P_1 и P_2 — реакторы, *1*—*6* провода от генераторов переменного тока, объединенные в группы *А*, *Б* и *В*. Если в какой-нибудь

группе получится короткое замыкание, в сети или на станции безразлично, усиление тока, связанное с замыканием, вызовет увеличение нагрузки и у генераторов других групп, если они не

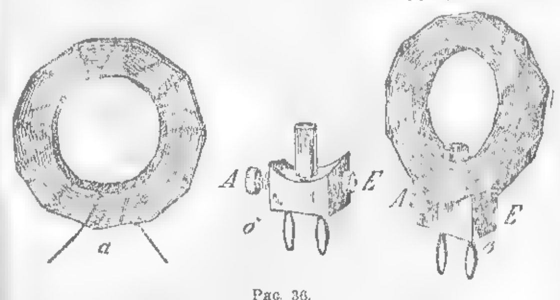


Рис. 36.

будут ограждены реакторами. Последние затормозят повышение силы проходящего через них тока, а в это время соответствующий масляный выключатель уже выключит часть установки, понесшей

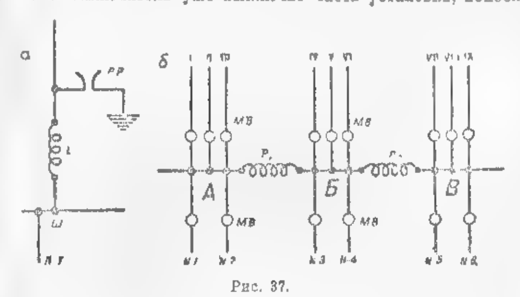


Рис. 37.

аварию, вследствие чего короткое замыкание в одной из групп не отразится на работе других.

Магнитный поток в проводе, в катушке и т. д. оказывает действие и на соседние провода или катушку, при чем обе эти части взаимно действуют друг на друга. Электродвижущая сила,

возникающая в каждой части в результате такого взаимного воздействия, носит название электродвижущей силы взаимоиндукции. С ней, например, приходится считаться при расчете линий передачи.

§ 38. Емкость.

Включим гальванический элемент или динамомашину постоянного тока на конденсатор C по схеме a рис. 38. Стрелка прибора A, показывающего силу тока, только дрогнет, как бы от толчка, и затем останется на нуле, так как конденсатор почти мгновенно зарядится, приобретет разность потенциалов, равную и противоположную напряжению источника тока, и ток по цепи более итти уже не будет. Заменим теперь источник постоянного тока переменным (схема b рис. 38). Когда ток пойдет по направлению стрелки, показанной сплошной линией, верхняя обкладка конденсатора зарядится положительно, нижняя — отрицательно. Когда ток переменит свое направление (пунктирная стрелка), он сначала уничтожит прежний заряд, доведет конденсатор до нулевого состояния и затем перезарядит его так, что знак плюс будет уже на нижней обкладке конденсатора. Вслед за тем ток, показанный сплошной стрелкой, с своей стороны, должен будет разрядить конденсатор и затем сообщить ему противоположный прежнему заряд и т. д. Таким образом при переменных токах все время имеет место перезарядка обкладок конденсатора, и, следовательно, прибор A все время будет давать показания, так как переменный ток в цепи будет итти непрерывно. То количество электричества в кулонах Q (как сообщалось, 1 кулон = 1 ампер-секунде), которое сообщается конденсатору до полного его заряда, зависит от напряжения заряжающего источника тока или разности потенциалов на обкладках конденсатора V и от

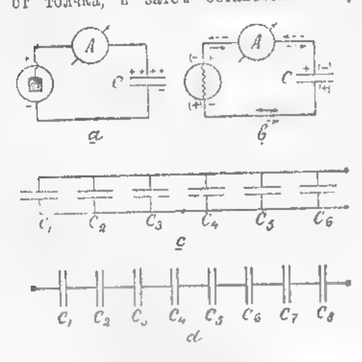


Рис. 38.

емкости конденсатора C. Зависимость эта выражается формулой

$$Q = C \cdot V. \tag{48}$$

Емкость конденсатора измеряется фарадами и микрофарадами. Если мы в формуле (48) приравняем единице Q и V, т. е. возьмем конденсатор с количеством электричества в 1 кулон и с разностью напряжений в 1 вольт, то C будет равно единице, т. е. емкость его будет равна единице емкости, соответствующей другим электрическим единицам. На основании этого можно сказать: тот конденсатор, который вместит в себе 1 кулон электричества и зарядится при этом до одного вольта, называется конденсатором, имеющим электроемкость, равную 1 *фараде*. Но так как единица эта очень крупная, то на практике емкость измеряют *микрофарадами*, при чем 1 микрофарада равна одной миллионной фарады. Шар емкостью в одну фараду должен иметь радиус около 9 миллионов км. Емкость земного шара приблизительно равна 650—700 микрофарадам. В радиотехнике и микрофарада часто является величиной слишком крупной. Поэтому там за единицу для измерения принят сантиметр, при чем

$$1 \text{ микрофарада} = 900\,000 \text{ см} = 9 \cdot 10^5 \text{ см},$$

$$1 \text{ фарада} = 9 \cdot 10^{11} \text{ см} = 10^{-9} \text{ единиц } CGS.$$

Емкость конденсатора C зависит от величины поверхностей обеих обкладок, от толщины промежуточного изоляционного слоя, называемого *диэлектриком*, и от вещества последнего. Емкость тем больше, чем больше поверхность обкладок и чем тоньше слой диэлектрика. Емкость вместе с тем пропорциональна так называемой *диэлектрической постоянной* изолирующего слоя. На таблице XII (стр. 96) приведены диэлектрические постоянные для различных веществ. Диэлектрическая постоянная воздуха принята равной единице. На основании этой таблицы можно заключить, что, если, например, в конденсаторе с воздушным диэлектриком заменить воздух парафином, то емкость увеличится в 2—2,3 раза. По типу выполнения на практике можно встретить (рис. 39, конденсаторы шаровые *1*, плоские *2*, концентрические *3*, как, например, двужильный кабель, и проволочные *4*, обычно свернутые на цилиндре в виде катушки. Каждая воздушная электрическая линия, каждый подземный кабель представляют собою емкость. Если включать их в сеть постоянного тока, то они мгновенно зарядятся, при переменном же токе по цепи все время будет итти зарядный ток. Чем выше напряжение линии и чем ближе друг от друга расположены провода, тем зарядный ток

Таблица XII

Воздух	1,00059	Стекло	6 — 9
» практически	1	Слюда	5 — 7
Водород	1,000946	Гуттаперча	3,5 — 4
Парафин в твердом виде	2 — 2,3	Бумага сухая . . .	2,6
Керосин	2 — 2,2	Бумага парафинированная	3,5
Касторовое масло .	4.4 — 4 7	Бумага промасленная	4
Трансформаторное масло	2,22	Каучук серый . . .	2
Вода	80	Кабельная изоляция (из пропитанной бумаги)	3,5 — 4,3
Фарфор	4,5 — 5,1	Шеллак	3
Вазелин	2,2	Сера	2,2 — 4
Эбонит	3		

будет сильнее. В подземном кабеле близкое расстояние проводов друг от друга неизбежно. Там поэтому важную роль играет вещество диэлектрика, от выбора которого зависит величина емкости. Как на пример, укажем, что в городских телефонных кабелях, которые часто можно видеть подвешенными на столбах, изоляция берется воздушно-бумажная. Воздух здесь действует в сторону уменьшения диэлектрической постоянной. Как при проволочном конденсаторе (рис. 39, фиг. *4*) для большей компактности пару проводов, заменяющих две обкладки, свертывают в виде катушки, так и при поверхностном конденсаторе, для той же компактности, берут небольшие поверхности и соединяют их параллельно. На рис. 39, фиг. *5*, *6* и *7* представлен конденсатор,

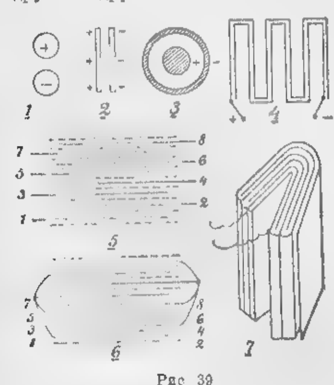


Рис 39

изготовленный из листов оловянной фольги с диэлектриком из пропарафинированной бумаги, взятой втройне. Как укладываются отдельные листики и как пачка их свертывается потом в книжку, видно из рисунков. Искусственные конденсаторы применяются в телефонных установках, радиосвязи, магнето для зажигания, катушках Румкорфа и пр. В качестве диэлектрика в них применяется слюда или парафинированная бумага.

В последнем рассмотренном нами случае мы, в сущности говоря, имеем несколько параллельно соединенных конденсаторов, которые заменяют один конденсатор с большой поверхностью. На рис. 38*c* соединено параллельно 6 конденсаторов. Их общая емкость определится по формуле:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6. \qquad (49)$$

При последовательном соединении (рис. 38*d*) общее напряжение между обкладками, как вообще при последовательно соединенных сопротивлениях:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 + E_7 + E_8;$$

общая емкость системы может быть найдена из формулы:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_5} + \frac{1}{C_6} + \frac{1}{C_7} + \frac{1}{C_8}. \qquad (50)$$

Если самоиндукция есть электрическая инерция, то емкость есть электрическая упругость. Из формулы (48) имеем:

$$C = \frac{Q}{V}.$$

Выражение это характеризует емкость и подобно упругости физических тел. На рис. 40 представлен сосуд A, соединенный гибкой трубой B с каучуковой трубой T. Меняя высоту H в сторону ее увеличения, мы заставим стенки трубки T растянуться и принять из резервуара некоторое дополнительное количество воды. При уменьшении давления трубка сожмется, и часть воды снова перейдет в резервуар. Количество воды Q, перемещаемое в трубу, зависит от давления H (разность потенциалов) и от большей или меньшей упру-

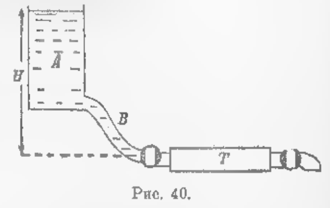


Рис. 40.

гости трубы (емкость C). Если сравнить две трубы одинаковых диаметров и длин (равных емкостей), то отношение $\frac{Q}{H}$ (как выше $\frac{Q}{V}$) может служить для сравнения упругостей этих труб.

§ 39. Самоиндукция и емкость в цепях переменного тока.

Если в цепь с самоиндукцией мы дадим переменный ток с напряжением E, в результате действия в цепи двух электродвижущих сил E и э.д.с.с. E_L мы будем иметь некоторую равнодействующую э.д.с. E_1, которой и будет *определяться* величина силы тока I. На рис. 41 имеем равнодействующую э.д.с. E_1 и совпадающий с ней по фазе ток I. Кривая э.д.с.с. E_L вписана в график, согласно нашим прежним рассуждениям (§ 37), так что при возрастании тока она противодействует этому возрастанию (э.д.с.с. — ратного направления), а при убывании тока она поддерживает его (э.д.с.с. — того же направления); при максимальном значении тока, когда он на короткое мгновение не меняется по величине (не меняется и магнитный поток), э.д.с.с. равна нулю; при переходе тока через нуль, т. е. при смене направления тока, э.д.с.с. имеет максимальное значение. Имея синусоиды E_1 и E_L, мы строим синусоиду напряжения E с таким расчетом, чтобы в каждый данный момент напряжение E_1 было равнодействующим, т. е. чтобы для каждой точки E_1 расстояние ее от горизонтальной оси (с плюсом над ней и с минусом под нею) равнялось алгебраической сумме расстояний соответствующих точек E и E_1. В результате мы видим что в рассматриваемом нами случае напряжение цепи E проходит через нуль раньше тока приблизительно на 0,12 периода, что в так называемой диаграмме векторов (справа рисунка) даст угол $\varphi = 360° : 12 = 30°$. На практике и говорят, что ток «запаздывает» от напряжения на угол φ. Это запаздывание тока по фазе есть результат действия самоиндукции. Всматриваясь в диаграмму, мы видим, что омическое (находимое по закону Ома) сопротивление цепи мы можем определить по формуле:

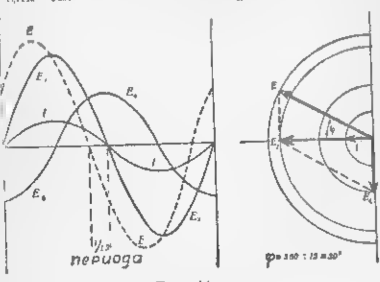


Рис. 41.

$$R = \frac{E_1}{I}.$$

Но, ведь, приборы (вольтметр и амперметр) дадут нам возможность определить несколько большую величину, которая в отличие от омического сопротивления называется *полным сопротивлением*:

$$Z = \frac{E}{I}. \qquad (51)$$

Выходит, что э.д.с.с., действуя в цепи переменного тока, уменьшает напряжение цепи или увеличивает сопротивление цепи, что в равной степени ведет к уменьшению силы тока. Поэтому и мощность, расходуемая в цепи, будет уменьшенная:

$$P = E_1 \cdot I, \text{ а не } E \cdot I.$$

На том же рис. 41 для начального момента диаграммы построена справа диаграмма векторов. Из нее видно, что напряжение E_1 есть действительно равнодействующее; в ней отмечен также угол сдвига фаз напряжения и тока φ. Вместо параллелограма напряжений мы можем ограничиться одним *треугольником напряжений*, хотя бы верхним, с углом φ. Между его сторонами существует такая зависимость:

$$E_1 = E \cos\varphi; \qquad E_L = E \sin\varphi.^{1} \qquad (52)$$

Такой же треугольник можно построить и для любого момента первой диаграммы.

Он всегда будет один и тот же и всегда будет давать зависимость между максимальными значениями э.д.сил, действующих в цепи. А так как действующие величины, как мы видели, меньше максимальных в $\sqrt{2}$, то этот же тре-

[1] Заметим, что $\cos\varphi$ (косинус угла φ) и $\sin\varphi$ (синус угла φ) суть известные из тригонометрии характеризующие угол отвлеченные числа — оба не больше единицы. Синус угла (острого в прямоугольном треугольнике) есть дробь, получающаяся от деления длины противолежащего ему катета на длину гипотенузы; косинус угла — дробь от деления прилежащего углу катета на гипотенузу.

угольник, взятый для другого масштаба, будет правилен и для действующих значений э.д. сил и напряжений и даст нам возможность при помощи геометрии (теорема Пифагора) и тригонометрии оперировать с электрическими величинами.

На рис. 42 выполнено построение для случая действия в цепи емкости. Конденсатор, заряжаясь, имеет э. д. с. E_c. Поэтому и в этом случае мы должны прежде всего зачертить э.д. силу E_1, как равнодействующую двух величин: напряжение цепи E и э.д.с. емкости E_c. Синусоида тока будет совпадать с синусоидой равнодействующей э.д.с. E_1. Кривую E_c впишем в диаграмму так, чтобы в момент прохождения тока через нуль заряд конденсатора и его э.д.с. были максимальными. Иначе, конечно, и быть не может, так как при перемене направления тока тотчас начинается уже разрядка конденсатора и, следовательно, уменьшение его э.д.с. (см. § 38). К моменту максимума тока разрядка эта будет приходить к концу, и вслед за тем начнется зарядка, при чем э.д.с. будет противоположна напряжению, дающему зарядный ток. Синусоиду E и в данном случае строим так, чтобы в каждый данный момент напряжение E было равнодействующим. В результате построений имеем, что ток в данном случае будет *опережать* напряжение на 0,12 периода или, в диаграмме векторов, на угол φ, равный 30°. Последняя диаграмма построена для момента, отмеченного буквой a. Здесь мы также можем выделить треугольник напряжений, при чем все формулы и рассуждения, проведенные выше для самоиндукции, будут правильны и для емкости. Между емкостью и самоиндукцией будет лишь та разница, что *емкость ведет к опережению тока, а самоиндукция к его запаздыванию.* Очевидно, при одновременном их действии может получиться их взаимное уравновешивание или проявление действия либо емкости, либо самоиндукции, а именно того, что в цепи является преобладающим.

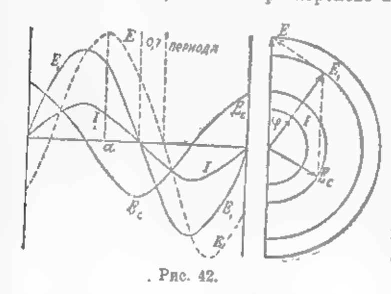


Рис. 42.

§ 40. Мощность в цепях переменного тока.

Если в цепи переменного тока нет ни емкости ни самоиндукции или если их действия взаимно компенсируются (уравновешиваются), то действующее напряжение цепи E целиком будет идти на образование в цепи тока I, и формула мощности для однофазного тока будет подобна случаю прохождения в цепи постоянного тока (26):

$$P = E \cdot I.$$

При действии самоиндукции или емкости в цепи однофазного тока мощность, как мы уже отмечали в § 39, будет уменьшена до величины $P = E_1 \cdot I$. Подставляя в последнее выражение значение E_1, взятое из формулы (52), получим выражение мощности из величин, которые можно получить, пользуясь измерительными приборами (вольтметр, амперметр, измеритель $\cos\varphi$, называемый фазометром):

$$P = EI \cos \varphi. \tag{53}$$

Здесь уместно отметить, что и измерительные приборы, непосредственно отмечающие мощность и называемые ваттметрами, дают мощность, вычисляемую именно по формуле (53).

В трехфазном токе при соединении обмоток машин треугольником, если цепь не имеет ни самоиндукции, ни емкости, мощность каждой фазы $p = e \cdot i$, мощность трех фаз $P = 3e \cdot i$. Подставляя вместо фазных линейные величины тока и напряжения [пользуясь формулами (43) и (44)], получим:

$$P = 3e \cdot i = 3E \frac{I}{\sqrt{3}} = E \cdot I \sqrt{3} = 1{,}73\, E \cdot I. \tag{54}$$

Подставляя в выражение $P = 3e \cdot i$ вместо фазных значений линейные величины, данные для случая соединения обмоток машины звездою в формулах (45) и (46), опять получим то же выражение, что и в формуле (54). Наши выкладки мало изменятся, если мы, учтя наличие в цепи емкости или самоиндукции, примем мощность каждой фазы трехфазного тока, согласно формуле (53), в $p = e \cdot i \cdot \cos\varphi$. Повторяя дальше наши рассуждения, получим для этого случая формулу:

$$P = E \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi. \tag{55}$$

Таким образом, в случае действия в цепи переменного тока самоиндукции в формулу мощности входит множитель $\cos\varphi$, называемый *коэффициентом мощности.* А так как этот коэффициент меньше единицы, то мощность в цепи с самоиндукцией

всегда будет меньше мощности в цепи без самоиндукции при одинаковых значениях электродвижущей силы и силы тока. На практике поэтому часто получается, что машины, трансформаторы или электродвигатели по силе тока загружены полностью, не давая в то же время своей полной мощности. Следовательно, весьма желательно коэффициент мощности ($\cos\varphi$) иметь возможно большим (ближе к 1, когда $\varphi = 0$).

Произведение $E \cdot I$ в однофазном или $E \cdot I \cdot \sqrt{3}$ в трехфазном токе называют кажущейся мощностью, измеряемой в вольт-амперах или киловольт-амперах. Произведение $E \cdot I \cdot \cos\varphi$ и $E \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi$ называют действительной мощностью, которая измеряется ваттами или киловаттами. Мощность альтернаторов и трансформаторов обычно указывается в киловольт-амперах.

§ 41. Задачи.

1. Катушка с железным сердечником при включении в цепь постоянного тока напряжением 110 вольт дает ток в 10 ампер, а при включении в цепь переменного тока такого же напряжения дает ток в 2 ампера. Определить кажущееся, или полное и омическое сопротивления катушки.

Омическое сопротивление, по закону Ома:

$$R = \frac{110}{10} = 11\ \Omega.$$

Кажущееся сопротивление по формуле (51):

$$Z = \frac{110}{2} = 55\ \Omega.$$

2. Индукционная катушка с железным сердечником) с омическим сопротивлением $R = 11$ ом включена в цепь переменного тока напряжением 110 вольт. Определить э.д.с.с., развиваемую в этой катушке при токе в 2 ампера.

Потеря напряжения на омическое сопротивление:

$$E_1 = 2 \cdot 11 = 22\ \text{V}.$$

Зная один катет треугольника напряжений и гипотенузу $E = 110$ вольт, второй катет найдем на основании теоремы Пифагора.

$$E_L = \sqrt{110^2 - 22^2} = \sqrt{12100 - 484} = \sqrt{11616} \approx 108\ \text{V}.$$

Второй способ решения.

Потеря напряжения:

$$E_1 = 22 = E \cos\varphi,$$

откуда

$$\cos\varphi = \frac{E_1}{E} = \frac{22}{110} = 0{,}2,$$

и из справочных таблиц $\varphi = 78^\circ 20'$ и $\sin\varphi = 0{,}979$

Тогда по формуле (52):

$$E_L = E \sin\varphi = 110 \cdot 0{,}979 \approx 108\ \text{V}.$$

3. Определить мощность, потребляемую катушкой задачи 2 в цепи переменного тока.

По формуле (53):

$$P = E \cdot I \cos\varphi = 110 \cdot 2 \cdot 0{,}2 = 44\ \text{W}.$$

4. Индукционная катушка при напряжении в 50 вольт развивает э.д.с.с. в 30 вольт. Определить омическую потерю напряжения в катушке и угол φ.

Так как $E = 50$ и $E_L = 30$, то по теореме Пифагора:

$$E_1 = \sqrt{E^2 - E_L^2} = \sqrt{50^2 - 30^2} = \sqrt{1600} = 40\ \text{V}$$

На основании формулы (52):

$$\cos\varphi = \frac{E_1}{E} = \frac{40}{50} = 0{,}8,$$

откуда

$$\varphi = 36^\circ 50'.$$

5. В сети трехфазного тока, питающей лампочки накаливания, идет ток (в каждом проводе) в 30 ампер. Определить мощность, потребляемую сетью, если напряжение ее 120 вольт.

$$P = E \cdot I \cdot \sqrt{3} = 120 \cdot 30 \cdot 1{,}73 = 6228\ \text{W}.$$

6. Электродвигатель трехфазного тока, включенный в цепь с напряжением 220 вольт, расходует ток в 10 ампер. Определить потребляемую и полезную мощность двигателя, а также число развиваемых им лошадиных сил, если $\cos\varphi = 0{,}7$ и коэффициент полезного действия $\eta = 0{,}8$.

По формуле (55) находим потребляемую двигателем мощность:

$$P = 220 \cdot 10 \cdot 0{,}7 \cdot \sqrt{3} = 2660\ \text{W}.$$

Его полезная мощность $P = 2660 \cdot 0{,}8 = 2128$ ватт, что в лошадиных силах составит 2128 : 736 = 2,9 л. с.

7. Определить стоимость отпускаемой в месяц энергии двигателю предыдущей задачи, если число рабочих часов в месяц составляет 200 и если 1 киловатт-час стоит 8 коп.

При мощности, потребной для двигателя, в 2660 ватт или 2,66 квт, расход энергии в месяц выразится суммой: $W = 2{,}66 \cdot 200 = 532$ квт-часа, что даст $8 \cdot 532 = 4256$ коп., или 42 руб. 56 коп.

§ 42. Гистерезис и токи Фуко.

Так называемые постоянные магниты состоят обыкновенно из куска специальной стали, закаленной раз навсегда, и свое намагничивание они сохраняют неопределенно долгое время при условии, впрочем, бережного с ними обращения. Электромагниты же, имея обычно железный сердечник, проявляют свою маг-

нитную силу лишь когда по обмотке их течет ток, при перерыве же последнего почти все намагничивание теряется. Этот ток поэтому и называется *намагничивающим* или *возбуждающим*. Величина магнитного потока, проходящего через сердечник электромагнита (или через магнит), определяется числом магнитных силовых линий Ф. Если мы число этих силовых линий рассчитаем на 1 кв см сечения сердечника, то получим так называемую магнитную индукцию B.

Представим себе простой электромагнит $Э_1$ с железным сердечником (рис. 43). Проведем его через полный цикл намагничивания, для чего будем менять намагничивающий ток от нуля до величины OM в обоих направлениях.

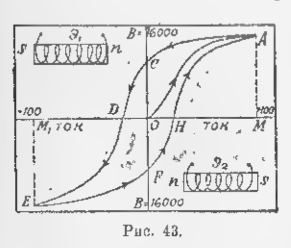


Рис. 43.

Начальный момент: сила тока равна нулю; железо не намагничено, магнитная индукция $B = 0$.

1-ая часть: намагничивание изменением тока от 0 до величины $+OM$. Индукция в железе сердечника будет возрастать сначала быстро, затем медленнее. К концу операции, в точке A железо так насыщено магнитными силовыми линиями, что дальнейшее усиление тока (свыше $+OM$) может дать самые незначительные результаты, почему операцию намагничивания можно считать законченной. Намагничение до *насыщения* означает, что имеющиеся в сердечнике молекулярные магниты, находящиеся в начале процесса намагничения в полном, а затем лишь в частичном беспорядке, почти все расположились теперь стройными рядами, северными полюсами в одну сторону, южными в другую, почему на одном конце сердечника мы имеем теперь северную полярность, на другом — южную ($Э_1$ на рис. 43).

2-я часть: ослабление магнетизма вследствие уменьшения тока от $+OM$ до 0 и полное размагничивание при токе — OD. Магнитная индукция, изменяясь по кривой AC, дойдет до значения OC, в то время как ток уже будет равен нулю. Эту магнитную индукцию называют *остаточным магнетизмом*, или остаточной магнитной индукцией. Для уничтожения ее, для полного, следовательно, размагничивания, необходимо дать в электромагнит ток обратного направления и довести его до значения, соответствующего на чертеже ординате OD.

3-я часть: намагничивание в обратную сторону путем изме-

нения тока от — OD до — OM_1. Магнитная индукция, возрастая по кривой DE, дойдет до точки E, соответствующей моменту насыщения. При этом имеем численное равенство $+MA$ и — M_1E, $+OM$ и — OM_1, но наименование полюсов сердечника электромагнита уже переменилось ($Э_2$ на рис. 43).

4-я часть: ослабление магнетизма постепенным *уменьшением тока* от — OM_1 до нуля (остаточный магнетизм OF) и последующее размагничивание путем перемены направления тока и доведения его до величины $+OH$.

5-я часть: намагничение, соответствующее процессу 1-й части; доведение магнитной индукции от нуля до $+MA$ путем изменения тока от $+OH$ до $+OM$.

Рассмотренный нами полный цикл намагничения сердечника электромагнита заставляет нас притти к заключению, что при уменьшении размагничивающего тока до нуля не все элементарные или молекулярные магниты (мельчайшие магнитики, состоящим из которых мы представляем себе магнит) приходят в прежнее беспорядочное состояние, но часть их сохраняет свое положение, соответствующее последнему направлению намагничения, почему при смене направления тока начальный момент намагничения в противоположном направлении запаздывает. Это явление запаздывания или задерживания магнетизма носит название гистерезиса.

При намагничивании стали как-раз важно получить большой остаточный магнетизм или остаточную магнитную индукцию B_r (на рис. 43 — OC) при значительной задерживающей силе H_c (на рис. 43 — OD). Первая величина обусловливает нам сильный магнит, вторая величина — его постоянство. Специальные сорта стали (вольфрамовая, хромовая и кобальтовая) удовлетворяют этим требованиям. Для них мы имеем следующие данные:

	H_c	B_r
Хромовая сталь	50—70	11 000—8000
Вольфрамовая сталь	50—75	11 000—8600
Кобальтовая сталь (36% коб.) . . .	190—280	10 000—8000

Когда железо подвергают повторному намагничиванию и размагничиванию (например, железного сердечника трансформатора, см. схему *II* рис. 30), то на преодоление остаточного магнетизма приходится затрачивать электрическую энергию. Элементарные магнитики, поворачиваясь при перемагничивании на 180°, вызывают трение между отдельными частичками железа, образующими эти магнитики. Эта работа трения проявляется в виде нагревания железа, сопровождаемого характерным шумом, и связана также с дополнительным расходом электрической энергии. Общая мощ-

ность, теряемая на гистерезис, пропорциональна следующим величинам: весу металла, подвергаемого последовательным намагничиваниям в обоих направлениях, числу циклов намагничивания в секунду (практически — числу периодов в секунду), величине получаемой максимальной индукции B, взятой в степени 1,6, и коэффициенту η, зависящему от природы металла (формула *Штейнметца*). В переменных токах число циклов намагничения соответствует числу периодов в секунду. Следовательно, во всех электромагнитных механизмах, и в частности в электродвигателях и трансформаторах, потери на гистерезис будут меньше при меньшем числе периодов (см. § 34). Эти потери, как и потери на токи Фуко, относят на практике к магнитным потерям.

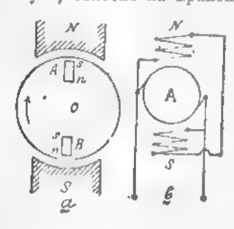


Рис 44.

С потерями на гистерезис приходиться считаться и при постоянном токе. Так, якорь машины, находясь в сфере магнитного потока, создаваемого электромагнитами, намагничивается, и его отдельные элементарные магниты располагаются под полюсами так, как показано на рис. 44*a*. В пункте A северный полюс направлен к оси O, когда же машина сделает пол-оборота и пункт A окажется под южным полюсом электромагнитов, то элементарный магнитик этого пункта повернется к оси O уже южным полюсом, как это и показано для начального момента применительно к пункту B. Следовательно, якорь перемагничивается, и на гистерезис приходится расходовать часть затрачиваемой на машину энергии, при чем и здесь эта потеря зависит от вышеуказанных величин.

Но можно указать и на случай, когда этот гистерезис оказывается полезным. Так, всякая из современных машин постоянного тока есть машина с самовозбуждением, так как развивает в себе э.д.с. исключительно за счет имеющегося в ней остаточного магнетизма. Когда машину (рис. 44*b*) пускают в ход, якорь A вращается в магнитном поле, создаваемом лишь остаточным магнетизмом полюсов, и дает э.д.с., например, 4—5 вольт, как это и показывает начальная точка кривой э.д.силы на рис. 45. Тогда в полюсы под действием этой э.д.с. начинает итти ток, который усиливает магнетизм, отчего э.д.с. еще возрастает и т. д., но, как и следовало ожидать, не до бесконечности, так как кривая намагничивания имеет загиб (см. рис. 43), и по мере увеличения намагничивающего тока, возрастающего с увеличением э.д.с. якоря, машина постепенно доходит до со-

стояния, близкого к насыщению полюсов силовыми линиями. Величина намагничивающего тока поэтому не превосходит 2—3% тока якоря. Зависимость э.д.с. машины от тока в обмотках электромагнитов представлена на рис. 45, из которого видно, что при токе в полюсах, равном нулю, э.д.с. уже имеет некоторое значение.

Представим себе схематически боковой вид якоря A машины (рис. 44). При вращении якоря в его проводниках, как мы уже знаем, возникает э.д.с., направление которой условно показано на рис. 46 стрелками. Но ведь и сам якорь изготовлен из токопроводящего материала. Следовательно, и в железе якоря, движущемся в магнитном потоке, возникает э.д.с., которая тут же в железе дает токи. Эти токи замыкаются в якоре наподобие вихрей, почему и называются *вихревыми токами*.

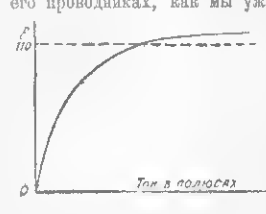


Рис. 45

А так как образование их связано с известной затратой энергии, то токи эти называются также *паразитными*. У нас чаще всего называют их *токами Фуко*, по имени французского физика Фуко, впервые изучившего их. Токи Фуко возникают везде в массивных частях машины, которые подвержены действию магнитного потока, и, помимо затраты на них энергии, замыкаясь в тех же частях, где они получились, они производят их нагревание. Для уменьшения потерь на эти токи якоря машин постоянного и переменного тока изготовляют из тонкого листового железа специального сорта, чтобы и потери на гистерезис были в нем минимальными. Из такого же железа изготовляют и сердечники электромагнитов и трансформаторов, так как под влиянием переменных магнитных потоков во всех магнитопроводящих частях возникают токи Фуко.

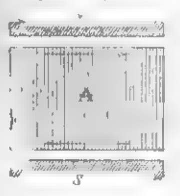


Рис. 46.

Если мы один провод, несущий переменный ток, проложим в трубе или окружим железной оболочкой (бронированный кабель), то под действием переменного магнитного потока, создаваемого током, в трубе или в броне возникнут токи Фуко, во избежание чего необходимо оба провода переменного тока заключить в одну общую броню или трубу, так как в этом случае два тока про-

тивоположных направлений дадут два противоположных и взаимно-уничтожающих магнитных потока. При трехфазном токе по тем же причинам надлежит укладывать в одной трубке или заключать в одну броню все три фазных провода.

Если труба, прикрывающая провод с переменным током, железная, то к потерям на токи Фуко прибавятся еще и потери в этой трубе на гистерезис. Вот почему при прокладке проводов с переменным током в железных трубках, согласно правилам и нормам, принятым в СССР и за границей, «все проводники, принадлежащие к одной цепи, должны быть заключены в общую трубку».

В отношении же медных трубок такой оговорки в правилах не делается.

Токи Фуко не всегда являются вредными. В некоторых случаях (например, при тормозных устройствах) ими пользуются как рабочими токами.

§ 43. Вопросы для повторения.

1. Что такое электродвижущая сила самоиндукции и при каких условиях она возникает?
2. Как проявляет себя самоиндукция в проводах связи, в обмотке возбуждения шунтовой машины постоянного тока?
3. Что такое коэффициент самоиндукции и какими единицами он измеряется?
4. Для чего применяют бифилярную обмотку?
5. Как проявляет себя емкость при прохождении постоянного и переменного тока?
6. Как измеряется емкость и от чего она зависит?
7. Какие типы конденсаторов встречаются на практике? Как устраиваются искусственные конденсаторы?
8. Чему равняется емкость параллельно и последовательно соединенных конденсаторов?
9. Какое действие оказывает самоиндукция в цепи переменного тока?
10. Что такое полное, или кажущееся, и омическое сопротивление?
11. Что такое треугольник напряжений?
12. Какое соотношение существует между действующей величиной и максимальным значением электродвижущей силы в цепи переменного тока?
13. Как действует в цепи переменного тока емкость? Какая разница между действием емкости и самоиндукции?
14. Как выражается мощность в цепи переменного тока? Что такое коэффициент мощности?
15. Какая разница между кажущейся и действующей мощностью?
16. Что такое гистерезис и как приходится с ним считаться на практике?
17. Что такое токи Фуко и как приходится с ними считаться на практике?
18. Каким требованиям должен удовлетворять постоянный магнит?

§ 44. Закон Ленца.

Представим себе динамомашину, якорь которой вращается по направлению стрелки I (рис. 47). Применяя правило правой руки, мы можем найти направление электродвижущей силы, индуктируемой в якоре. Как только якорь начинает давать ток, его сердечник намагничивается. Если мы будем смотреть на якорь по оси AB со стороны B и примем его обмотку за обмотку электромагнита, то со стороны B ток по этой обмотке покажется нам идущим по часовой стрелке; это является признаком, что сердечник якоря имеет с данной стороны южный полюс. Рассматривая машину со стороны A, получим направление тока в проводниках якоря против часовой стрелки и придем к заключению, что в стороне A якоря будет северный полюс. А так как одноименные полюсы взаимно отталкиваются, а разноименные взаимно притягиваются, то между сердечниками полюсов и якоря получится взаимодействие в виде так называемого вращающего момента в направлении стрелки II. Чем сильнее ток в якоре, иначе говоря, чем больше нагрузка внешней цепи, тем сильнее это взаимодействие, тем больше вращающий момент, направленный по стрелке II. Но, ведь, якорь вращается по стрелке I, и только поэтому в нем индуктируется э.д.с. определенного нами направления, дается ток в цепь и возникает отмеченное выше взаимодействие. Выходит, что в машине при получении от нее тока возникает противодействующий вращающий момент (по стрелке II), увеличивающийся по мере роста нагрузки машины и тока в якоре. Сказанное дает нам объяснение, каким образом и почему по мере роста нагрузки машины требуется и соответствующее увеличение мощности двигателя, вращающего эту машину. Мы видим, что для создания электрического тока в замкнутой цепи при помощи электромагнитной индукции необходимо преодолеть силу (электромагнитную силу), которую испытывает проводник с током, находящийся в магнитном поле. В этом заключается сущность закона Ленца, который выражается следующим образом:

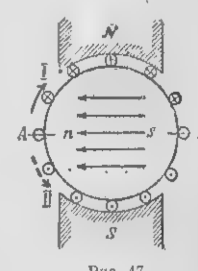


Рис. 47.

Индуктированный ток всегда имеет такое направление, при котором возникающая электромагнитная сила стремится препятствовать изменению (или движению), вызывающему индуктирование тока.

Возникающие в якоре токи Фуко тоже, следовательно, будут такого направления, что создадут противодействие вызывающему их движению и потребуют дополнительного усилия со стороны двигателя, вращающего генератор.

Обращаясь к рис. 29, мы видим, что и в случае вращения полюсов неподвижная обмотка якоря альтернатора дает намагничивание якоря, в котором получается столько северных и южных полюсов, сколько полюсов и в роторе. Так как одноименные полюсы взаимно отталкиваются, а разноименные — притягиваются, то и в данном случае между сердечниками полюсов и якоря получается взаимодействие в виде противодействующего вращающего момента. В железе якоря кроме того возникают токи Фуко, которые усиливают это противодействие.

В случае самоиндукции, при увеличении числа силовых линий и возрастающем токе в проводнике, мы знаем, возникает ток обратного направления, стремящийся ослабить силовой поток, т. е. опять имеет место противодействие. При уменьшении же числа силовых линий, связанного с уменьшением тока в проводнике, э.д.с. дает ток, стремящийся поддержать в прежнем виде силовой поток.

Закон Ленца, во всех случаях разъясняющий явление электромагнитной индукции, в общей форме может быть выражен так: *ток, индуктируемый при изменении силового потока, стремится противодействовать изменению последнего.*

§ 45. Типы машин-генераторов электрического тока.

Говоря о получении тока в машинах (§§ 32 и 34), мы показали на рис. 31 обмотку *кольцевого якоря* исключительно вследствие его простоты. В настоящее время этот кольцевой якорь в машинах постоянного тока встречается очень редко. Обычный тип якоря машин постоянного тока — *барабанный*, как это и показано на рис. 48, на котором мы видим: якорь A с двумя вентиляционными каналами B, служащими для охлаждения, и двумя бандажами $Б$, скрепляющими уложенную на якоре обмотку, так как иначе она под действием центробежной силы может отделиться от



Рис. 48.

якоря; коллектор (коммутатор) K, являющийся, как было указано в § 32, необходимой частью каждой машины постоянного тока.

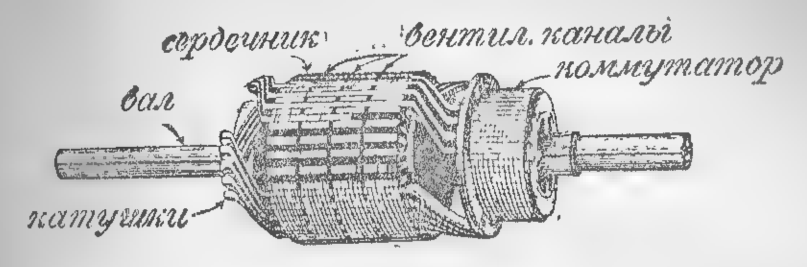


Рис. 49

Обмотка для якоря обычно изготовляется заранее в виде отдельных катушек, которые затем укладываются на якоре. Якорь, не собранный до конца, представлен на рис. 49. В целях уменьшения потерь на гистерезис якорь изготовляется из специальных сортов мягкого железа. В целях же уменьшения вредного действия токов Фуко, железо это не берется в виде сплошного сердечника, а последний собирается из отдельных листов, о форме которых можно судить по рис. 50.

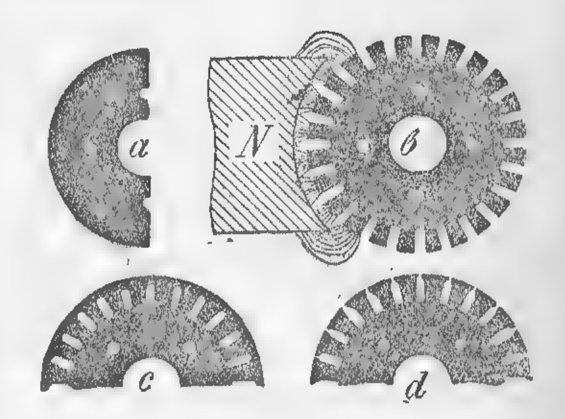


Рис. 50.

Как видно из рис. 50, якорь имеет зубчатую форму. Обмотка якоря укладывается во впадины между зубцами. Деталь якоря, заключающая три впадины и проводники в одной из впадин, представлена на рис. 51.

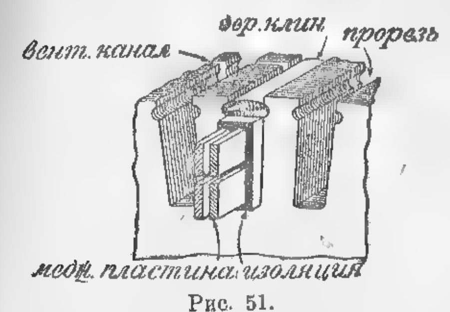


Рис. 51.

Коллектор состоит из большого количества пластин твердотянутой меди, изолированных от корпуса и друг от друга. Взаим-

ная изоляция пластин выполняется слюдою или миканитом. Вид одного из коллекторов с торцевой части и его разрез представлены на рис. 52. На вал A насажена чугунная букса, состоя-

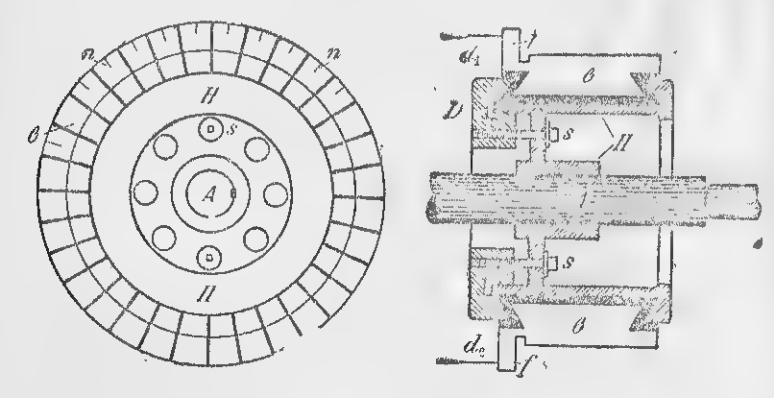


Рис. 52.

щая из двух частей D и H, скрепленных болтами S. Обе эти части крепко удерживают собранные по их окружности пластины b. Сегменты или пластины коллектора со стороны якоря имеют выступы («петушки») f, в концы которых впаиваются соединительные проводнички d_1 обмотки.

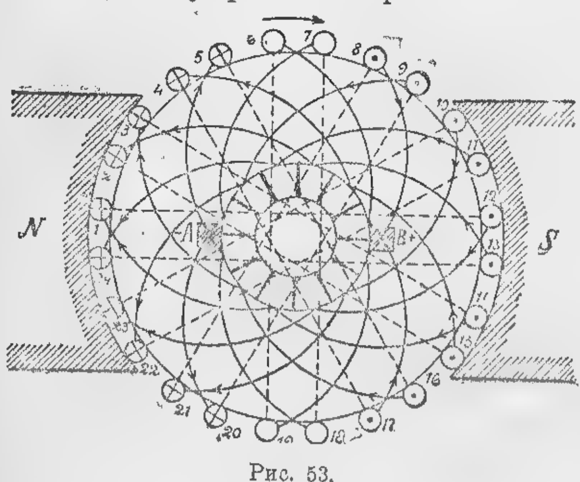


Рис. 53.

Обмотка якоря гладкого, не зубчатого (чисто условно), представлена на рис. 53. Проводников на якоре показано 24, коллекторных пластин — 12. Ток отводится через щетки A и B.

На рис. 53 показано направление тока в отдельных проводниках и отмечена полярность щеток. Обмотка показана самая простая, с небольшим числом проводников. О том, какое количе-

ство проводников имеется на самом деле, давалось представление ранее, в таблице XI. Обмотка рис. 53 — петлевая. Почему она носит такое название, легко видеть из рис. 54, где часть той же обмотки представлена в развернутом виде. Отдельная петля обмотки выделена здесь более толстыми линиями. Ток от положительной щетки поступает из машины на линию и возвращается к отрицательной щетке, разветвляясь в обмотке по двум параллельным линиям. На рис. 53 легко проследить путь тока по этим

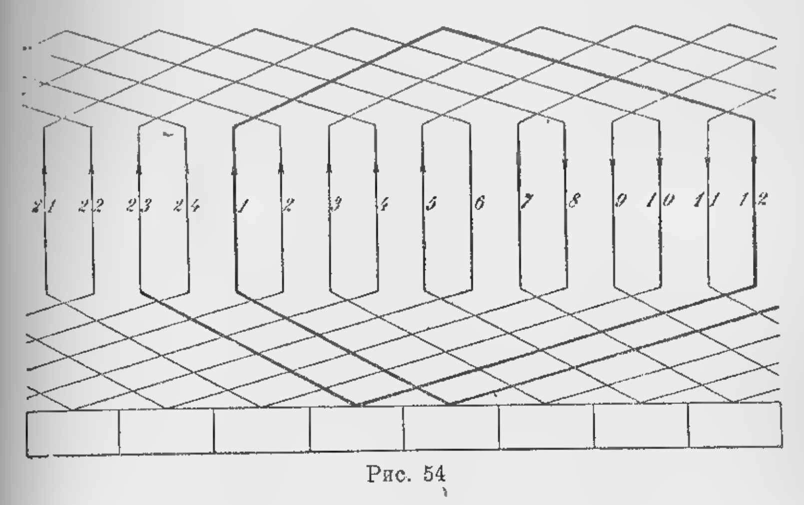


Рис. 54

ветвям от щетки A до щетки B. Если записать последовательно все проводники каждой ветви, то получим следующие номера проводников:

Отрицательная щетка A	В первой ветви имеются проводники 20 — 9 — 22 — 11 — 24 — 13 — 2 — 15 — 4 — 17 Во второй ветви имеются проводники: 5 — 16 — 3 — 14 — 1 — 12 — 23 — 10 — 21 — 8	Положительная щетка B

Проследив все проводники в порядке их нумерации, мы увидим, что выше нами пропущены проводники 7 и 18 и 6 и 19. Те и другие в цепи не вошли, так как первые два замкнуты на короткое щеткой A, а вторые две — щеткой B. Таким образом при вращении якоря каждая из щеток все время будет замыкать какую-нибудь пару проводников.

Обмотка другого типа, волновая, представлена на рис. 55 и 56. Как видно из рис. 56, обмотка действительно идет волною.

В данном случае мы имеем следующие две параллельные группы

$$\left|\begin{matrix} 1-10-17-26-3-12-19-28-5-14-21-30 \\ 22-13-6-27-20-11-4-25-18-9 \end{matrix}\right|$$

При этом щетка + замыкает на короткое проводники: *7 — 16 23 — 2*, щетка — замыкает на короткое проводники: *29 — 8 15 — 24*.

В схемах обмоток наблюдается достаточное разнообразие; мы ограничимся лишь указанием, что петлевые обмотки применяются в машинах невысокого напряжения (110, 220 вольт) и при больших силах тока, волновые обмотки — в машинах повышенного напряжения, как, например, трамвайных (440, 500 и более вольт).

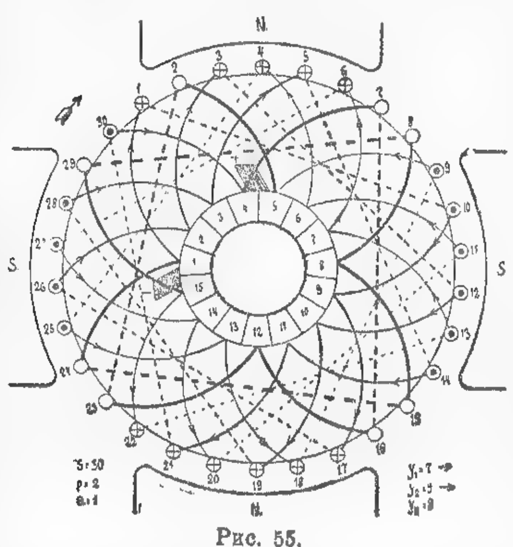


Рис. 55.

На рис. 57 представлен общий вид машин — *двух-* и *многополюсной* — и двух типов якорные зубцы. Двухполюсные машины применяются в настоящее время только для малых мощностей (от 0,01 до 3 л. с.) и в турбогенераторах, многополюсные машины строятся для мощностей, начиная от 1 л. с. и выше. Якорь большой тихоходной машины имеет большие размеры; его железо укрепляется на так называемой якорной звезде, похожей на маховое колесо с его спицами. Все машины работают с *самовозбуждением*, т. е. электромагниты питаются током от якоря своей же машины. Лишь в специальных случаях ток возбуждения берется со стороны, например, от другой динамомашины или от батареи аккумуляторов. Тогда говорят, что машина работает с *независимым возбуждением*. На рис. 58 даны схемы машин с самовозбуждением. В схеме *a* обмотка полюсов, имея много витков тонкой проволоки, присоединена к якорю параллельно. Это — машина *шунтовая* или *с параллельным возбуждением*. В схеме *b* мы имеем машину *с последовательным возбуждением (се-*

рие-динамо); обмотка полюсов у нее выполнена из малого числа витков толстой проволоки, так как она должна пропускать ток, идущий во внешнюю цепь. Машина схемы *c* имеет и ту и другую

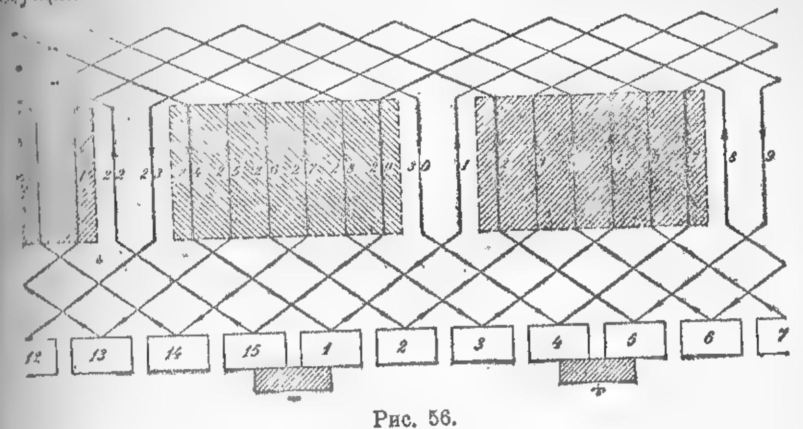


Рис. 56.

обмотку и называется *компаунд* или машиной со *смешанным возбуждением*. Эти обмотки, обычно действуя согласованно, дают суммарный магнитный поток. В редких случаях потоки эти

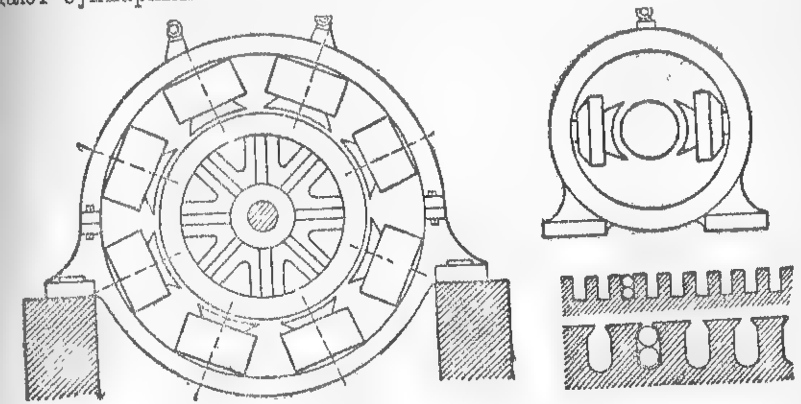


Рис 57.

берутся взаимно-противоположными, и действующий поток будет тогда равен разности двух потоков. Такая машина называется *компаунд-дифференциальной*, а последовательную обмотку в таких случаях называют часто противокомпаундной.

Число сериес-динамо, встречающихся на практике, незначительно. По их типу строятся, например, сварочные генераторы Элин. Машины шунтовые применяются для осветительных целей. Машины-компаунд обслуживают заводские установки, где на ряду с освещением есть и двигатели, и трамвайные станции. Машина шунтовая проще и потому несколько дешевле. Более дорогая машина-компаунд обладает свойством автоматически поддерживать более или менее постоянное напряжение у зажимов, что очень важно при работе станции на электродвигатели, дающие сильно колеблющуюся нагрузку, отчего и напряжение машин станции также должно было бы колебаться. Машины с противокомпаундной обмоткой можно встретить на ветроэлектрических станциях, в сварочных установках и на автомобилях.

Если в машине постоянного тока заменить коллектор кольцами (рис. 31), то, смотря по числу их, машина может дать однофазный, двухфазный, трехфазный и т. д. ток. Однако напряжение этих токов ниже напряжения постоянного тока. Так, если на коллекторе мы имели 100 вольт постоянного тока, то на кольцах будем иметь: при 1-фазном токе—70,7, при 2-фазном токе — 50, при 3-фазном токе—61,2, при 6-фазном токе 35,4 вольта. Следовательно, чтобы эти напряжения сделать приемлемыми для практики, пришлось бы менять напряжение при помощи трансформаторов или соответственно менять напряжение, подсчитанное для постоянного тока. Машины с вращающимся якорем и с кольцами, как генераторы тока, встречаются очень редко (при мощностях до 30 kW и напряжением до 500 V). Чаще встречаются такие машины, снабженные и коллектором и кольцами одновременно. Такие машины называются *конвертерами*; о них будет сказано особо в § 51.

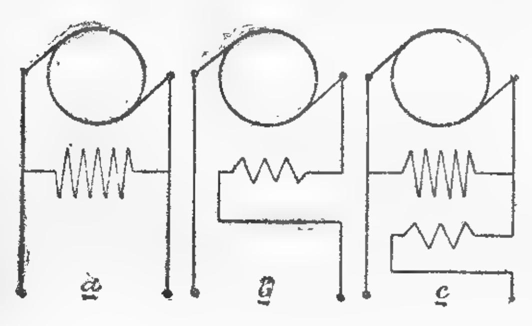


Рис. 58.

В качестве генераторов переменного тока (альтернаторов) применяются на электрических станциях машины с неподвижным якорем и вращающимися полюсами, питаемыми постоянным током при посредстве колец. Такую машину однофазного тока мы видим на рис. 59, на котором по окружности неподвижного якоря показано 6 каналов, и в каждом канале по одному проводнику. Направление индуктированной э.д.с. для случая вращения ротора по часовой стрелке определено по правилу левой руки (см. § 32) и указано на рисунке стрелками. Индуктор машины шестиполюсный, при чем катушки вращающихся электромагнитов питаются постоянным током, приводимым к ним при посредстве колец *K*. Для получения постоянного тока необходим, следовательно, отдельный генератор постоянного тока. На электрических станциях чаще всего каждая машина переменного тока имеет свой такой генератор, посаженный с нею на одном валу и называемый *динамо-возбудителем*.

На рис. 59 на каждый полюс приходится на якоре только по одному проводнику. На самом деле для обмотки якоря устраивают по нескольку каналов на каждый полюс, и в этих каналах помещают целые катушки из проводников, при чем одновременно полюсным наконечникам придают такие очертания, чтобы э.д.с. машины по возможности приближалась к синусоиде.

Рис. 59.

Рис. 60.

Примерное изображение части такой машины однофазного тока (с 3 каналами) дано на рис. 60, при чем для упрощения чертежа в каждой впадине показано лишь по одному проводнику. Для большей наглядности там же показана в развернутом виде и схема соответствующей части обмотки.

Схемы двух обмоток однофазных альтернаторов представлены полностью на рис. 61 и 62. В обоих случаях мы имеем восьмиполюсные машины с 64 каналами, в каждом канале по одному проводнику. На каждый полюс приходится по 8 проводников. Направления токов условно отмечены стрелками. На первой схеме все проводники соединены последовательно и составляют одну общую цепь, на второй схеме две половины машины составляют

самостоятельные цепи, которые и соединены параллельно. Машина таким образом имеет как бы две самостоятельные обмотки, у которых начала A_1—A_1 и концы A_2 — A_2 соединены вместе.

Чтобы обмотку показать в замкнутом виде, проводники, уложенные в каналах якоря, помещены на рис. 61 и 62 радиально.

Трехфазный альтернатор будет отличаться от однофазного числом и расположением фазных обмоток якоря. На рис. 63 показаны часть машины (якорь и полюсы) и схемы обмотки якоря трехфазного альтернатора с одним каналом на фазу и полюс.

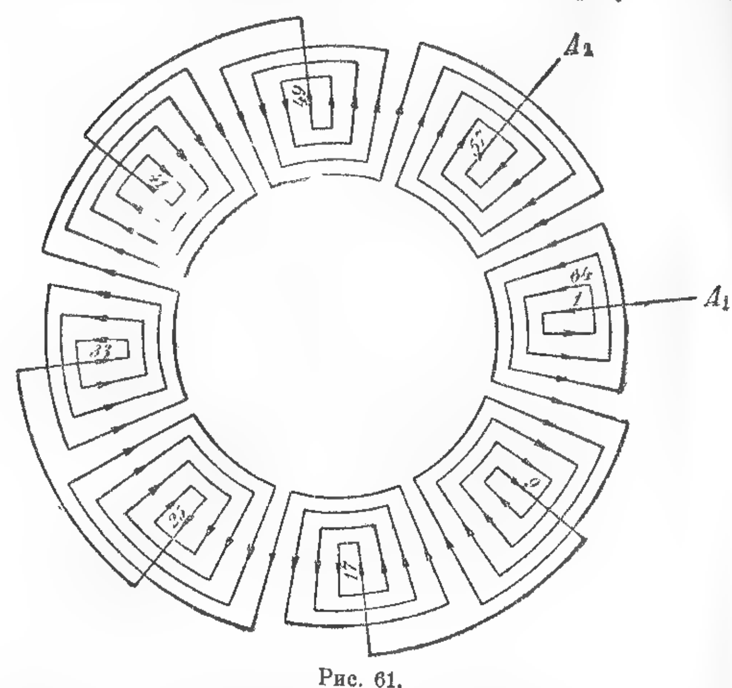


Рис. 61.

Чаще всего обмотки трехфазных альтернаторов выполняются с двумя, тремя или четырьмя каналами на каждый полюс и фазу. На рис. 63 (частично) и 64 изображена обмотка трехфазного четырехполюсного альтернатора, во втором случае с двумя каналами, приходящимися на каждый полюс и фазу. Начало каждой фазы помечено римскими и конец — арабскими цифрами (или наоборот). Концы и начала фаз нельзя брать произвольно в любом месте. Правильность выбора начала и конца фазы всегда можно проверить, пользуясь диаграммой рис. 32 (внизу, справа).

Так, в данном случае начало первой фазы *I* выбрано для момента, когда провода этой фазы дают максимальную электро-

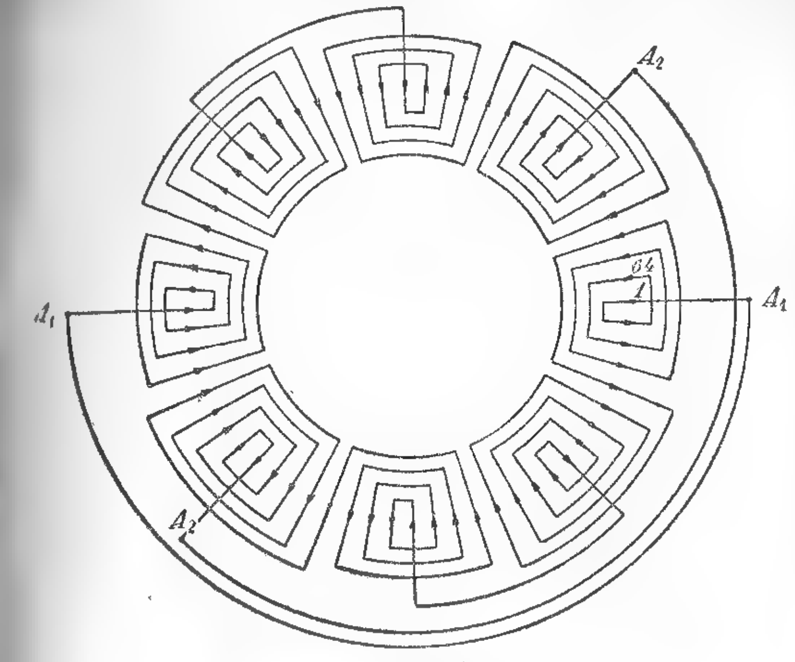


Рис. 62.

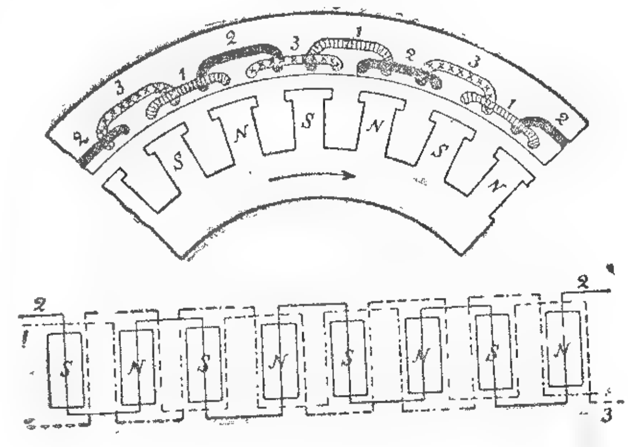


Рис. 63.

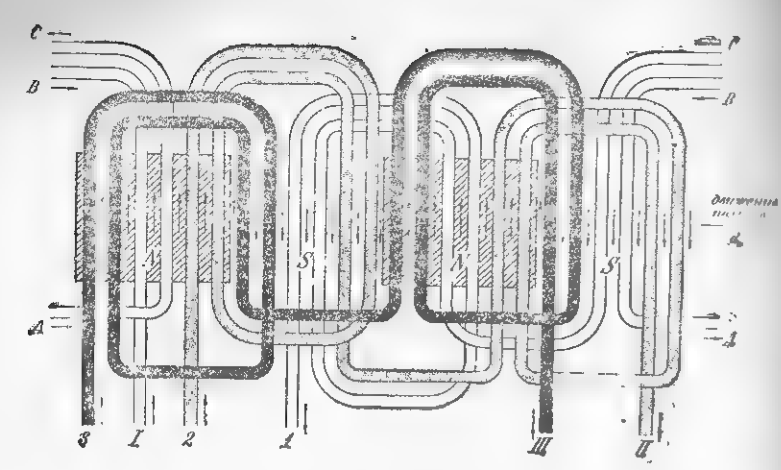


Рис. 64.

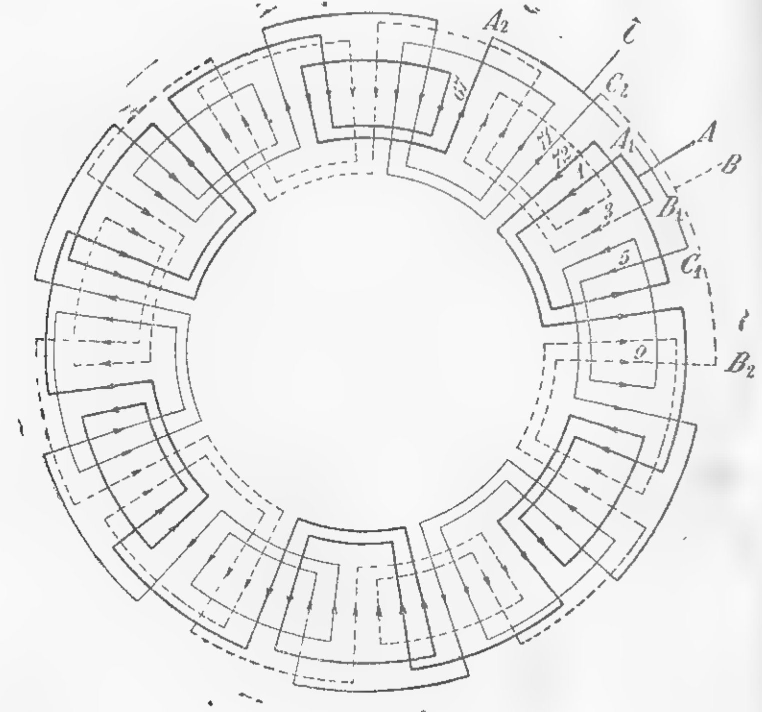


Рис. 65.

движущую силу и находятся под полюсом, условно обозначенным буквой *N*. Для этого же момента вторая фаза должна давать электродвижущую силу противоположного направления (синусоида *II*) и притом уже уменьшающуюся по величине. Противоположного направления, но увеличивающейся по величине должна в этот же момент быть и электродвижущая сила третьей фазы (синусоида *III*). В соответствии с такими соображениями и выбраны их начала *II* и *III*. Тогда сами собою определяются

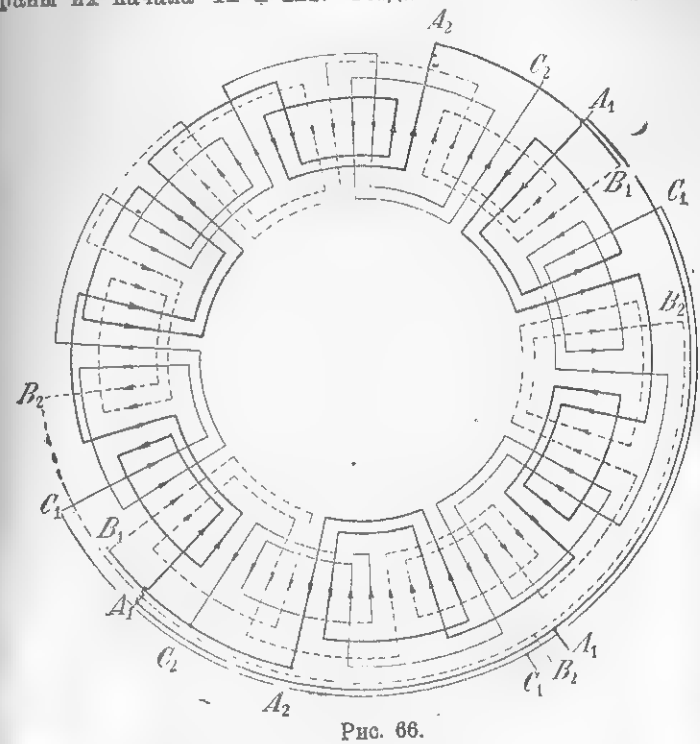


Рис. 66.

и концы фаз *1*, *2* и *3*. Обмотки 12-полюсных трехфазных альтернаторов представлены на рис. 65 и 66. В обоих случаях число проводников — 72, число проводников на фазу и полюс 2. На рис. 65 соединение выполнено по способу треугольника, на рис. 66 — звездою и с двумя параллельными ветвями, причем в обоих случаях проводники даны в радиальном положении. Многополюсные генераторы приводятся во вращение паровыми машинами, двигателями внутреннего сгорания или гидравлическими

двигателями. В случае же привода альтернаторов от паровых турбин они выполняются двух-, четырех- и шестиполюсными. На рис. 67 представлена схема двухполюсного альтернатора, имеющего 48 проводников и соединение звездой.

Понятие о внешнем виде трехфазного альтернатора небольшой мощности с ременным приводом от двигателя может дать рис. 68,

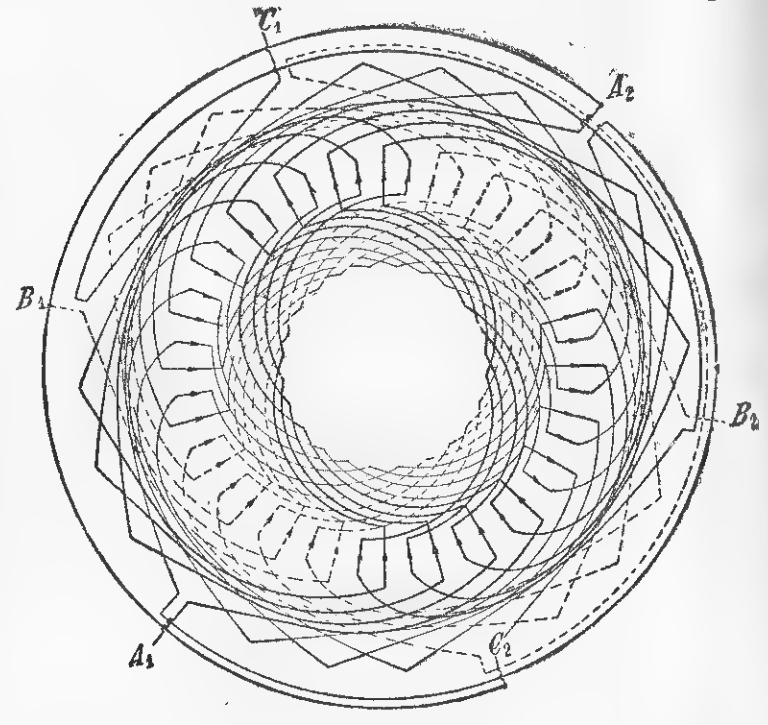
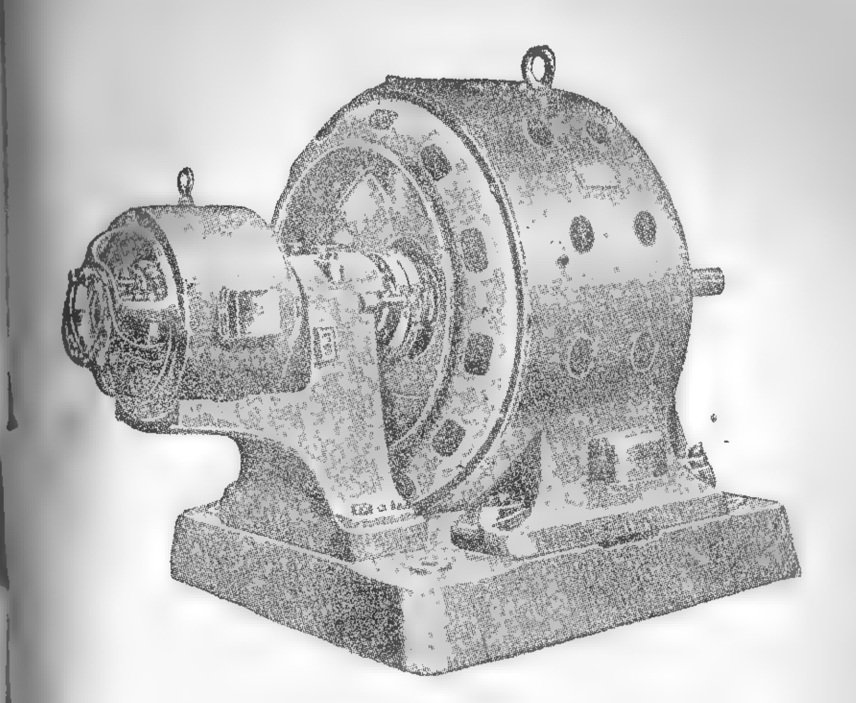


Рис. 67.

где мы видим динамо-возбудитель (слева на рисунке) и самый альтернатор. Другой трехфазный альтернатор для непосредственного соединения с тихоходным механическим двигателем представлен на рис. 69, где мы видим: *1* — вал машины, свободный конец которого (с противоположной стороны) служит для непосредственного соединения с двигателем, *2* — передний подшипник, *3* — вращающуюся часть машины *4* — ее обод, служащий для укрепления полюсов, *5* — полюсы, *6* — обмотку якоря, *7* — станину, *8* — раму машины, *9* — задний подшипник, *10* — свободный конец вала.


Рис. 68.

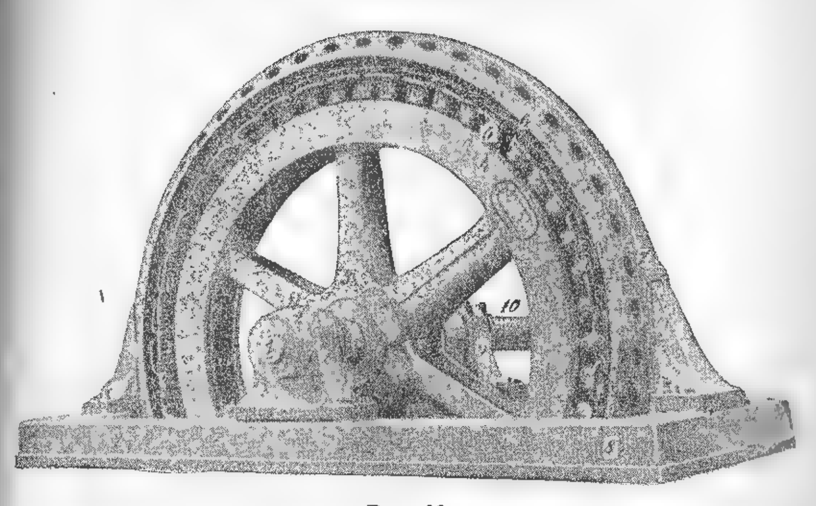
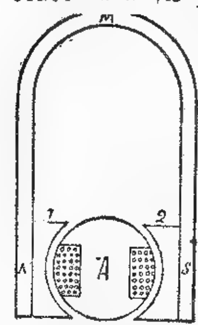


Рис. 69.

Конструкция быстроходных альтернаторов имеет более компактный вид. Она вместе с тем значительно сложнее, почему мы здесь ее не описываем.

На ряду с машинами-колоссами, мощность которых доходит теперь даже до 160 000 kVA, карликами должны казаться другого типа генераторы тока — магнитоэлектрические машины, употребляемые при двигателях внутреннего сгорания для зажигания (магнето) и в технике слабых токов (индукторы). Последние применяются в телефонии, в различного рода сигнализационных установках и, в частности, в железнодорожной сигнализации. Хотя эти машинки малы, но они выполняют весьма полезную и ответственную работу. Вспомним рис. 27, уясняющий нам принцип действия машины переменного тока. Индуктор устроен по такому же принципу. Якорь его, обозначенный на рис. 70 буквой A, имеет обмотку из изолированной проволоки и вращается между полюсными наставками, к которым привинчены 2, 3 или более постоянных магнитов. Якорь имеет шестеренку, сцепляющуюся с большим зубчатым колесом, на ось которого насажена рукоятка для вращения индуктора от руки, что впрочем не обязательно, и на больших телефонных станциях более мощные индукторы приводятся во вращение электродвигателями. Два конца обмотки якоря не подводятся к кольцам, а выведены к оси якоря, связанной с корпусом аппарата, и к изолированной части оси, как это условно и показано, применительно к принятым на электрических схемах обозначениям, на том же рис. 70. Зубчатая передача в таком случае уже не показывается, и рукоятка для вращения условно зарисовывается как одно целое с валом индукторного якоря.



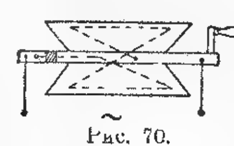


Рис. 70.

§ 46. Задачи.

1. Однофазный альтернатор, мощностью на 1200 киловольт-ампер, работает на осветительную установку. Определить, какое количество электрических лампочек одновременно может он питать, если напряжение машины 120 вольт, и лампы, включенные в цепь, потребляют каждая по 0,25 ампера.

Мощность машины $P = EI = 120$ kVA $= 120\,000$ VA.

Машина дает ток $I = P : E = 120\,000 : 120 = 1000$ ампер.

Число лампочек, которые она может питать одновременно

$$x = 1000 : 0{,}25 = 4000 \text{ штук.}$$

2. Определить мощность машины предыдущей задачи в киловаттах, если она работает на электродвигатели при $\cos\varphi = 0{,}8$.

Так как при индукционной нагрузке $P = E \cdot I \cdot \cos\varphi$, то в нашем случае имеем $P = 120 \cdot 0{,}8 = 96$ kW.

3. На электростанции установлено 3 трехфазных альтернатора по 30 000 киловольт-ампер. Определить общую мощность станции в киловаттах и лош. силах при $\cos\varphi = 0{,}8$.

Общая мощность станции:

в вольт-амперах . . 30 000·1000·3 = 30 000 000·3 = 90 000 000,
» ваттах . . . . . . 90 000 000·0,8 = 72 000 000,
» киловаттах . . . 72 000 000 : 1000 = 72 000,
» лош. силах . . . . 72 000 000 : 736 = 97 826.

4. Машина постоянного тока, работающая при напряжении 115 вольт, снабжена кольцами для получения трехфазного тока. Определить, с каким коэффициентом трансформации необходимо будет установить трансформатор для получения напряжения цепи в 230 вольт.

Согласно § 44, каждым 100 вольтам постоянного тока машины соответствует 61,2 вольта трехфазного тока. Поэтому при 115 вольтах постоянного тока на кольцах 3-фазного тока будем иметь напряжение:

$$E_1 = \frac{115 \cdot 61{,}2}{100} = 70{,}38 \text{ V},$$

а так как для сети требуется напряжение в 230 вольт, то необходимо установить трансформатор с коэффициентом трансформации [формула (40)]:

$$k = \frac{E_2}{E_1} = \frac{230}{70{,}38} = 3{,}26.$$

5. Трехфазный альтернатор, напряжением 230 вольт, дает ток 150 ампер при $\cos\varphi = 0{,}86$. Определить отдачу машины, если требуемая для нее мощность механического двигателя составляет 74,5 л. с.

По формуле (55) отдаваемая альтернатором мощность:

$$P = E \cdot I \cdot \sqrt{3} \cos\varphi = 230 \cdot 150 \cdot 1{,}73 \cdot 0{,}86 = 51\,400 \text{ W};$$

а так как потребная для машины мощность составляет в данном случае 736·74,5 = 54 800 ватт, то отдача машины:

$$\eta = \frac{51\,400}{54\,800} = 0{,}94.$$

6. Сопротивление r_m обмотки возбуждения шунтового генератора (рис. 58a) составляет 28,75 ома. Определить силу тока I_a в якоре, если напряжение E у зажимов машины составляет 115 вольт, а сила тока I во внешней сети равна 121 амперу.

Сила тока в цепи возбуждения, по закону Ома

$$i_m = \frac{E}{r_m} = \frac{115}{28{,}75} = 4\text{A}.$$

Так как якорь дает ток во внешнюю цепь и в свою обмотку возбуждения, то сила тока в якоре (по первому правилу Кирхгофа):

$$I_a = I + i = 121 + 4 = 125\text{A}.$$

7. Определить э.д.с машины предыдущей задачи, если сопротивление R_a обмотки якоря составляет 0,02 ома.

При силе тока в якоре $I_a = 125$ ампер, на преодоление сопротивления обмотки якоря (щеток и контакта щеток с коллектором) расходуется напряжение:

$$e = I_a \cdot R_a = 125 \cdot 0{,}02 = 2{,}5 \text{ V}.$$

Отсюда э.д.с. генератора

$$E_0 = E + e = 115 + 2{,}5 = 117{,}5 \text{ V}.$$

8. Генератор-компаунд (рис. 58с) дает во внешнюю цепь ток силою $I = 100$ ампер при напряжении у зажимов $E = 120$ вольт. Определить электродвижущую силу якоря, если его сопротивление R_a равно 0,015 ома, сопротивление обмоток возбуждения составляет: шунтовой $R_m = 61$ ома и последовательной $R_s = 0{,}02$ ома.

Потеря напряжения в последовательной обмотке, по закону Ома, составляет:

$$e = I \cdot R_s = 1000 \cdot 0{,}02 = 2 \text{ вольта}.$$

Напряжение у зажимов якоря в таком случае будет составлять

$$E_1 = E + e = 120 + 2 = 122 \text{ вольта}.$$

Сила тока в шунтовой обмотке возбуждения, по закону Ома:

$$i_m = E_1 : R_m = 122 : 61 = 2 \text{ амперам}.$$

Сила тока в якоре, по первому правилу Кирхгофа:

$$I_a = I + i_m = 100 + 2 = 102 \text{ A}.$$

Потеря напряжения в якоре:

$$e_1 = I_a \cdot R_a = 102 \cdot 0{,}015 = 1{,}53 \text{ V}.$$

Э.д.с. машины:

$$E_0 = E_1 + e_1 = 122 + 1{,}53 = 123{,}53 \text{ V}.$$

§ 47. Вопросы для повторения.

1. В чем состоит закон Ленца и как он объясняет, почему с увеличением нагрузки динамомашины увеличивается нагрузка и механического двигателя, вращающего данную динамомашину?
2. Какой тип якоря применяется в современных динамомашинах постоянного тока?
3. Как устроен якорь и коллектор
4. Какие типы обмоток применяются в машинах постоянного тока?
5. Когда применяются машины с малым и когда с большим числом полюсов?
6. Откуда машина получает ток для обмотки возбуждения?
7. Как делятся динамомашины постоянного тока по способу их возбуждения и в каких случаях они применяются?

8. Как переконструировать машину постоянного тока в машину переменного тока? В каких случаях применяются такие машины?
9. Какая обычная конструкция альтернаторов?
10. Что такое динамо-возбудитель?
11. Как выполняются обмотки в однофазных альтернаторах?
12. Как выполняются обмотки трехфазных альтернаторов?
13. Как выбирают начала и концы в отдельных фазах обмотки трехфазного альтернатора?
14. Как устроены магнитоэлектрические машины и где они применяются?

§ 48. Принцип действия электродвигателей. Закон Био и Савара.

Электрическая и механическая формы энергии при помощи машин легко могут превращаться одна в другую. Так, в генераторах тока происходит преобразование механической энергии в электрическую. Вращая динамомашину при помощи какого-либо двигателя, мы от нее получаем ток. И обратно, если мы в такую машину дадим со стороны ток, она придет во вращение и может быть использована как всякий другой механический двигатель. Машина будет уже не генератором тока, а электродвигателем. Поэтому говорят, что электрическая машина (особенно постоянного тока) обратима.

Принцип действия электродвигателей основан на взаимодействии потока, создаваемого магнитом или электромагнитом, и проводника с током. Пусть на рис. 47 мы имеем электродвигатель. Если мы в него дадим ток, согласно рис. 47, то якорь намагнитится, между полюсами и якорем получится взаимодействие, и последний придет во вращение в направлении стрелки *II*. Направление это можно определить по правилу левой руки: кладем руку на проводник так, чтобы силовой поток входил в ее ладонь и четыре пальца показывали направление тока в проводнике; тогда большой палец покажет направление вращения мотора.

То механическое усилие, которое приводит якорь в движение, зависит от величины магнитного потока (или магнитной индукции B), силы тока I в якоре и от длины l в сантиметрах проводника, по которому в якоре идет этот ток; согласно *закону Био и Савара,* оно может быть определено в килограммах по следующей формуле:

$$P = \frac{BIl}{10 \cdot 981\,000}. \qquad (56)$$

Так как длина провода, уложенного на якоре в виде обмотки, не меняется, а магнитный поток и сила тока в якоре, наоборот, изменяются, то и механическое усилие на окружности якоря

будет изменяться вместе с изменением магнитного потока и тока в якоре. Чем больше или меньше эти величины, тем больше или меньше будет механическое усилие.

§ 49. Типы электродвигателей.

Рисунки 58, данные для динамомашин постоянного тока, пригодны и для электродвигателей, так как таковые, по способу их возбуждения, также делятся на двигатели с параллельным *возбуждением* или *шунтовые,* двигатели *с последовательным возбуждением* или *сериес* и двигатели *со смешанным возбуждением* или *компаунд.* Правда, в последнем случае шунтовую обмотку возбуждения присоединяют не к зажимам якоря (короткий шунт), как это показано на рисунке, а к внешним зажимам машины (долгий шунт).

Шунтовые двигатели обладают приблизительно постоянным числом оборотов и потому применяются там, где такое постоянство требуется, например, для приведения в движение станков и трансмиссий. Регулировка их скорости тоже очень простая, почему шунтовые двигатели применяют в устройствах, требующих в известных пределах регулировки скорости.

Последовательные двигатели (сериес-двигатели) развивают сильный вращающий момент при пуске в ход и по мере увеличения своей нагрузки уменьшают скорость. Эти два ценные свойства делают их весьма пригодными для тяги, почему в установках постоянного тока сериес-двигатели и находят применение для электрических кранов, подъемников, трамваев и электрических железных дорог. Двигатель-компаунд дороже описанных двигателей и применяется в особых условиях работы. Так например, в установках, где для пуска в ход требуется весьма большое усилие, а затем постоянная скорость, применяется шунтовой двигатель с дополнительной обмоткой — сериес, которая работает лишь при пуске двигателя в ход. Таким образом, такой двигатель работает со смешанным возбуждением лишь при пуске.

Обмотки якорей электродвигателей, как и динамомашин (таблица I), имеют малое сопротивление. Поэтому, если мы включим их в цепь без реостата, соединенного с якорем последовательно, то по закону Ома, в якорь пойдет ток значительной силы. В лучшем случае сгорят предохранители, в худшем — пострадает обмотка якоря. На рис. 71 представлены установочные схемы для двигателей — сериес (слева) и шунтового (справа). Обозначения схемы: *А* — якорь, *М*, — полюсы, *Л* — линия, *П* — предохранители, *Р* — двухполюсный рубильник, *а* — амперметр для измерения силы тока, *ПР* — пусковой реостат. При

пуске двигателя в ход рукоятку реостата (на рисунке — по часовой стрелке) переводят постепенно с холостого контакта до последнего, соответствующего нормальной работе двигателя. Проследив токопрохождение, можно убедиться, что в последнем случае работа мотора происходит уже без реостата. Причина этого в том, что двигатель, вращаясь, например, согласно рис. 47, против часовой стрелки, может быть рассматриваем как генератор, ибо налицо имеется движение проводника в магнитном поле, создаваемом полюсами. В таком случае в нем должна индуктироваться э.д.с., направление которой мы можем определить по правилу правой руки. Делая это применительно к рис. 47, мы

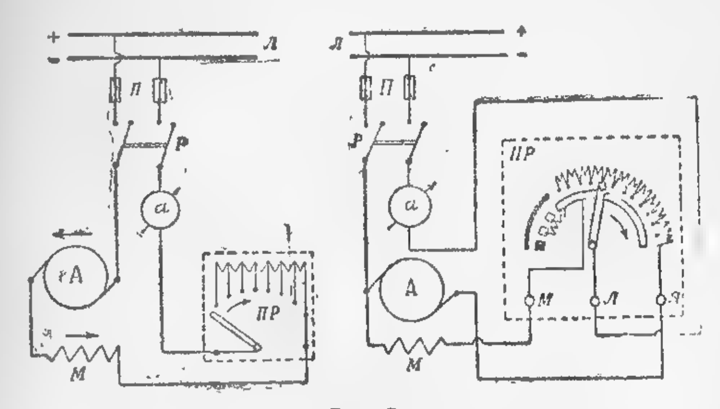


Рис. 71.

видим, что под северным полюсом э.д.с. мотора будет обращена к нам, т. е. против того тока и, следовательно, напряжения, которые мотор имеет от цепи. Эта противодействующая э.д.с. мотора называется *обратной э.д.с. мотора.* При наличии ее формула закона Ома для электродвигателя принимает такой вид:

$$I = \frac{E - e}{R_1 + R_2}, \tag{57}$$

где E — напряжение цепи, e — обратная э.д.с. мотора, R_1 — сопротивление якоря двигателя, R_2 — сопротивление реостата.

При пуске двигателя в ход его обратная э.д.с. равна нулю, почему и требуется введение в цепь реостата полностью. По мере увеличения числа оборотов соответственно растет обратная э.д.с. мотора, почему постепенно и выводятся секции реостата. И, наконец, когда скорость вращения мотора достигнет

нормальной величины, э.д.с. двигателя также будет нормальной, и надобность в реостате уже отпадет.

Следует отметить, что в отличие от схем, представленных на рис. 71 (а также 79, 80 и 81), рубильники обыкновенно ставят до предохранителей, так как в этом случае смена последних не будет производиться «под током».

Весьма просто осуществить в двигателе перемену направления вращения. Если мы для двигателя (рис. 47) переменим направление тока в якоре или в полюсах (изменится полярность), он переменит направление вращения. Применяя правило левой руки, можем убедиться, что новое вращение будет определяться уже стрелкой *1*.

Регулирование скорости электродвигателей постоянного тока обычно производится при помощи реостатов. На рис. 72 мы имеем двигатели шунтовой *I* и сериес *II*. У обоих реостаты *1*, введенные последовательно с якорем, служат для уменьшения числа оборотов в сравнении с нормальным. Реостаты же *2*, включенные для одного двигателя последовательно с цепью возбуждения, для другого параллельно с ней, т. е. — шунтом, в обоих случаях уменьшают ток в полюсах, что приводит к увеличению числа оборотов сверх нормы.

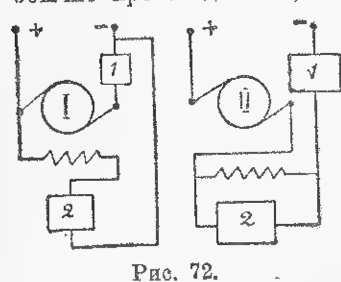


Рис. 72.

Обыкновенные пусковые реостатов ни в коем случае не могут нести функций реостатов *1*, хотя тоже включаются с якорями моторов последовательно. Причиной этого является то обстоятельство, что пусковые реостаты рассчитаны лишь на непродолжительное нагревание их током значительной силы и потому, будучи использованы как регулировочные, сгорят. [1]

Типы применяемых на практике реостатов весьма разнообразны. Мы уже ознакомились с простыми *пусковыми* и *регулировочными* реостатами. Существуют комбинированные реостаты (для пуска и регулировки), реостаты для автоматического выключения мотора в случае нагрузки двигателя, превосходящей допустимую, *реверсивные* пусковые реостаты, позволяющие пускать моторы в оба направления вращения, *жидкостные* или жидкие пусковые реостаты для моторов большой мощности и т. д. В трамвайных и крановых установках для пуска в ход и управления двигателями (регулирование скорости, перемена направления вращения) применяются особые переключатели, называемые *контроллерами*.

[1] О материалах для реостатов см. § 13 настоящей книги.

Реостатные спирали, секции или ленты сопротивлений, заменяюшие реостаты, помещаются обыкновенно отдельно от контроллера. Наконец, в сложных схемах управления двигателями (как в домовых и заводских подъемных машинах, электровозах и т. д.) применяются *реле*, понятие о которых в применении, впрочем, для других случаев, дано ниже в § 60.

Вследствие весьма простой обратимости машин постоянного тока двигатели постоянного тока имеют ту же конструкцию, как и генераторы. Таким образом, конструкция шунтового двигателя одинакова с конструкцией шунтового генератора, конструкция компаундного двигателя такая же, как конструкции компаундного генератора. Поэтому при производстве электрических машин заводы часто применяют одни и те же образцы машин постоянного тока как для генераторов, так и для двигателей, в случае необходимости меняя на них лишь фирмовые дощечки (марки). Для примера даем следующие данные для одного типа машин, изготовляемых заводом «Электрик» в Ленинграде.

	Электродвигатель	Динамомашина
Мощность в киловаттах	11	12
Напряжение в вольтах	110 или 220 [1]	110 или 220 [1]
Число оборотов в минуту	3000	3000
Тип	11–4,0	11—4,0
Коэффициент полезного действия	0,8	0,8
Вес в кг	215	215

Таким образом покупатель, заказавший один двигатель и один генератор указанного типа, получит по существу две одинаковые машины. Любую из них он может использовать и как генератор и как двигатель, применяя в первом случае шунтовой регулятор (реостат в цепи возбуждения) и во втором случае — пусковой реостат.

Подобно динамомашине постоянного тока обратим и альтернатор. Всякий современный генератор переменного тока будет более или менее удовлетворительно работать в качестве двигателя. При этом как у генератора для определенного числа периодов должна быть определенная скорость вращения, так у двигателя при данном числе периодов в линии получается строго опреде-

[1] Напряжение у динамомашины часто берут примерно на 5% выше, примерно на столько же повышая и число оборотов.

Число оборотов в минуту	3000	3000
Тип	11—4,0	11—4,0
Коэффициент полезного действия	0,8	0,8
Вес в кг	215	215

ленная скорость вращения (число оборотов).[1] Отсюда проистекают некоторые особенности двигателя: при пуске его нужно развернуть до нормальной скорости; сильно и быстро его перегружать нельзя, так как он может потерять свою скорость и остановиться; для обеспечения от таких случаев вращающуюся часть двигателя делают более тяжелой. Двигатель этот в виду таких его особенностей применяется лишь в специальных случаях.

В области переменных токов наиболее распространенными являются трехфазные *асинхронные* двигатели. Для устройства этих двигателей пользуются явлением, открытым еще знаменитым французским физиком *Араго* (1786—1853). Араго показал, что при вращении постоянного магнита около оси *O—O* (рис. 73) в ту же сторону вращается и медный диск *D*, помещенный на острие над магнитом. Явление это объясняется токами Фуко, которые возникают в диске при вращении магнитного поля постоянного магнита, и взаимодействие которых с этим магнитным полем создает силу, увлекающую диск в сторону вращения магнитного поля. Вращающееся магнитное поле легко можно получить при помощи многофазных токов. Получая его в неподвижной части машины, называемой статором, можно привести во вращение другую, подвижную часть, называемую ротором.

Рис. 73.

Обмотка статора в асинхронных двигателях выполняется так же, как и обмотки якорей альтернаторов. Для наших рассуждений достаточно упрощенной схемы обмоток. На рис. 74 даны синусоидальные кривые изменения тока (или магнитного потока) в фазных обмотках статора трехфазного двигателя. Отметим на этой диаграмме пять точек (*1*, *2*, *3*, *4* и *5*) и рассмотрим, что дают они для обмотки статора в отдельности. Сообразно с этим обмотки статора на том же рис. 74 показаны в условной зарисовке. Так мы видим 3 фазы, соединенные звездой. Пяти точкам диаграммы соответствуют пять схем статорной обмотки мотора. Отдельные фазы, получая ток того или другого направления, дают магнитные потоки, а их результирующий поток проходит внутри кольца статора по стрелке, показанной на рисунках. Проследя ее положение, мы видим, что она поворачивается по часовой стрелке. Следовательно, мы имеем вращающееся поле ста-

[1] Ввиду такой зависимости генераторы и двигатели называются синхронными машинами.

тора. Если в этом поле мы поместим полый барабан (ротор), то он, подобно медному кольцу в приборе Араго, придет во вращение. Посмотрим теперь, как получается вращающееся поле в

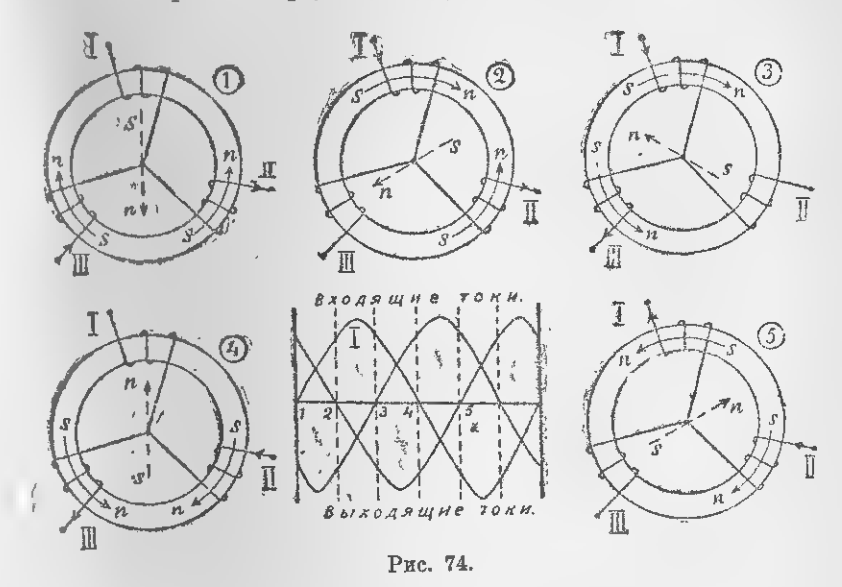


Рис. 74.

двигателях с неподвижным якорем и вращающимися полюсами. Для этого представим себе трехфазный альтернатор с тремя положениями роторного колеса со сдвигом каждый раз на $^1/_{12}$ окруж-

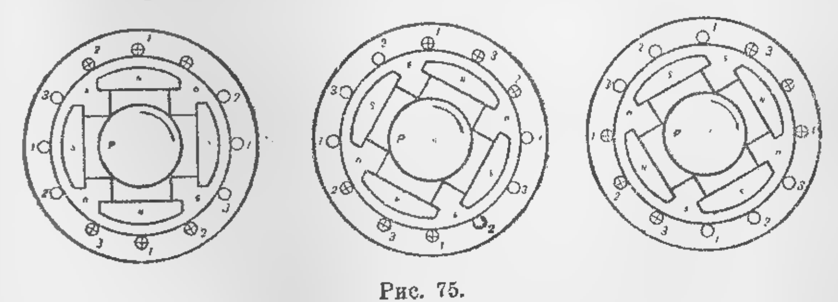


Рис. 75.

ности или на 30°. Сообразно с тремя различными чередующимися положениями полюсной системы покажем направления токов в проводниках якоря, размещенных на статоре. Проводники эти имеют нумерацию в зависимости от той фазной обмотки, которой

они принадлежат. Если мы теперь, подобно тому, как это сделано на рис. 29 для якоря однофазного альтернатора, учтем, что под действием токов, проходящих под обмотками статора, якорь намагничивается, то мы сможем для всех трех положений рис. 75 показать, в каких местах статора получаются полюсы. Во всех трех случаях мы получим четыре полюса, при чем увидим, что полюсы эти все время перемещаются, и перемещение это происходит в строгом соответствии с перемещением полюсов ротора. Другими словами, скорость вращения полюсов статора равна скорости вращения роторного колеса и потому может быть определена по формуле (39):

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}.$$

Если мы теперь уберем из машины роторное колесо с его полюсами, поставим вместо него полый железный цилиндр и будем

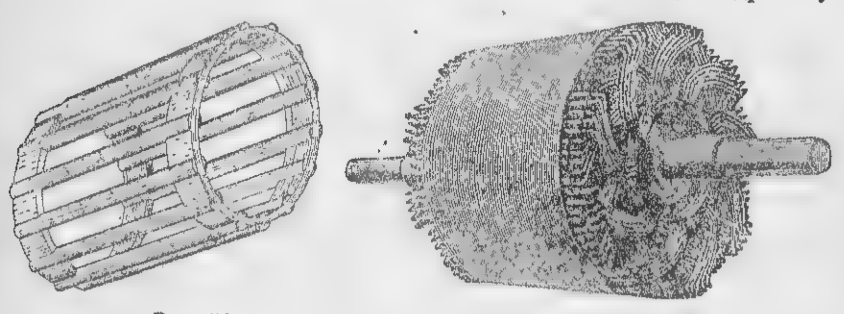


Рис. 76. Рис. 77.

дем питать статорные обмотки машины трехфазным током от сети, то статор и теперь даст вращающееся поле с двумя северными и двумя южными полюсами, которое, как и в случае диска Араго, приведет ротор во вращение. Если бы мы на рис. 75 имели первоначально ротор с шестью полюсами, то обмотка статора была бы построена на создание шести полюсов и т. д. Во всех случаях мы имели бы вращающееся поле, при чем скорость перемещения полюсов всегда можно было бы подсчитать по выше приведенной формуле.

Ротор в трехфазных двигателях может быть различной конструкции. Так, цилиндры из листового железа с уложенными на них неизолированными проводниками (рис. 76) применяются в качестве роторов для моторов малой мощности. Для получения лучшего механического эффекта роторы (рис. 77) снабжают тремя

фазными обмотками, как и статор. Под действием тока в обмотке статора, в роторе, как во вторичной обмотке трансформатора, индуктируется э.д.с. Если обмотки соединить между собою и замкнуть на короткое, по ротору пойдет ток, и он придет во вращение. Электродвигатели с короткозамкнутыми роторами готовят теперь на различные мощности. Часто мощные двигатели имеют выведенные к трем контактным кольцам концы. На рис. 78 эти кольца показаны слева. При посредстве щеток, наложенных на кольца, ротор соединяется с пусковым реостатом. На рис. 79 показаны установочные схемы мотора с короткозамкнутым и фазным роторами. После пуска мотора в ход реостат замыкает отмотку ротора на короткое и становится ненужным. Так как щетки остаются при этом прижатыми к кольцам, то они сильно изнашиваются, и на трение их о кольца приходится затрачивать энергию. Во избежание этого, а также могущего быть сопроти-

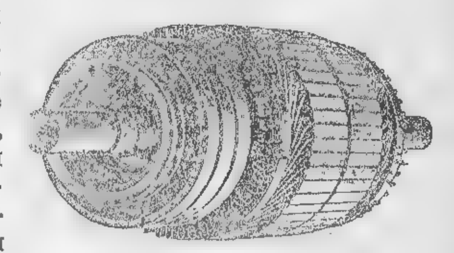


Рис. 78.

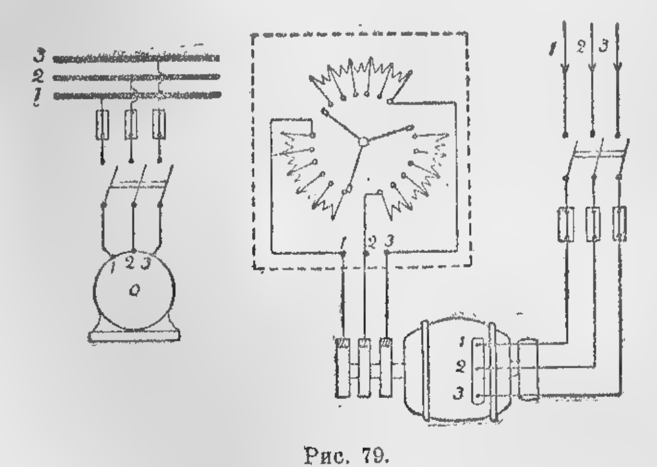


Рис. 79.

вления в контакте щеток, в моторах большой мощности устраивают приспособления для замыкания ротора на короткое при помощи особого кольца с одновременным отведением щеток от контактных колец.

Для перемены направления вращения мотора достаточно взаимно

переключить концы двух линейных проводов, подводимых к статору, так как от этого магнитный поток статора будет вращаться в другую сторону и, следовательно, в другую сторону будет увлекаться этим потоком и ротор. Если бы последний имел скорость вращения, равную скорости поля статора, т. е., синхронную скорость, как у синхронного двигателя, определяемую по формуле (39), то не было бы пересечения потоком статора проводников ротора, в проводниках последнего не было бы тока, и тогда не получилось бы взаимодействия по закону Био и Савара, необходимого для вращения. Тогда мотор замедлил бы ход, снова получилось бы пересечение силового поля с ротором, и вновь получилось бы вращающееся усилие на окружности ротора. Из сказанного следует, что скорость ротора должна быть меньше скорости вращающегося поля статора. Ротор, говорят, имеет „скольжение". В таблице XIII приведены результаты подсчета по формуле (39) синхронной скорости для различного числа полюсов и для стандартного у нас числа периодов (50). В последнем столбце приведены примерные скорости роторов наиболее распространенных трехфазных двигателей. Большие цифры — для двигателей более мощных. Цифровые данные относятся к машинам наших заводов.

Таблица XIII.

Число полюсов	Число пар полюсов	Число оборотов в минуту	
		при синхронной скорости	при скольжении
2	1	3000	—
4	2	1500	1430—1415
6	3	1000	965— 940
8	4	750	720— 710
10	5	600	575— 565
12	6	500	475— 470

Для перемены направления вращения применяются специальные переключатели. В отношении переключателей, пусковых, регулировочных реостатов, контроллеров здесь наблюдается такое же разнообразие, как и у двигателей постоянного тока.

Вращающееся поле можно получить вообще лишь при многофазных токах. При однофазном токе, для пуска в ход приходится создавать вторую, искусственную, фазу. На рис. 80 дана схема однофазного асинхронного двигателя (с короткозамкнутым ротором). Обозначения: *1—1* — главная фаза статора, *2—2* — добавочная обмотка статора, *C* — индукционное сопротивление. Благодаря последнему в добавочной фазе получается некоторое запаздывание тока в сравнении с током главной обмотки, и тогда обе «фазы» дают вращающийся магнитный поток, помогающий мотору развернуться. После пуска мотора в ход работа может итти уже без добавочной фазы, почему она выключается (рубильником *P*). Однофазные моторы имеют много существенных недостатков, почему применение их очень ограничено. Кроме того и станции, вырабатывающие многофазный ток, представляют теперь редкое исключение.

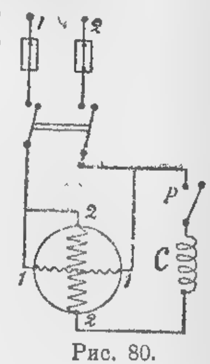


Рис. 80.

Способ получения вращающегося магнитного поля в обмотках, токи которых отличаются по фазе на 120°, был предложен в 1885 г. итальянским ученым Феррарисом, применение же этого принципа на практике и первоначальная разработка асинхронных двигателей составляют заслугу русского ученого и электротехника Доливо-Добровольского. Асинхронные двигатели потому так называются, что скорость их вращения не сихронна (не совпадает по времени) со скоростью поля статора.

Кроме асинхронных двигателей, на практике находят применение *коллекторные* двигатели переменного тока как однофазного, так и трехфазного. Из них однофазные двигатели *последовательные* применяются для тяги, однофазные *репульсионные* — в промышленности для станков и приводов. Схема последнего дана на рис. 81. Обозначения: *ПР* — пусковой реостат, *C* — обмотка статора, *Я* — якорь, снабженный коллектором, *ВВ* — щетки, замкнутые на короткое, *ОО* — положение щеток, соответствующее спокойному положению мотора. Пуск в ту или другую сторону определяется соответствующим сдвигом щеток от этой нейтрали, при чем большой сдвиг даст и большую скорость, конечно, до известных пределов. Репульсионный двигатель дорог, его коллектор составляет слабое место, почему конкурировать этому двигателю с простыми трехфазными асинхронными двигателями не приходится, особенно теперь, при повсеместном распространении трехфазного тока.

Коэфициент мощности синхронных двигателей практически

можно принять равным 1. Асинхронные трехфазные двигатели имеют коэффициент мощности 0,84 и ниже. Чем меньше мощность двигателя, тем меньше его коэффициент мощности. У небольших и мало загруженных двигателей он иногда снижается даже до 0,3. Коэффициент мощности однофазных асинхронных двигателей ниже, чем у таких же трехфазных двигателей. В § 39 нами уже было отмечено, как важно иметь в сети более высокий коэффициент мощности ($\cos\varphi$). В отношении его многие станции у нас начинают предъявлять своим абонентам очень жесткие требования, вводя при плохом коэффициенте мощности повышенный тариф за энергию. Улучшения $\cos\varphi$ можно достичь применением синхронных двигателей, которые действуют подобно емкости (§ 39), отчего их иногда и называют «синхронными конденсаторами». Улучшения $\cos\varphi$ достигают, применяя и трехфазные коллекторные двигатели новейших конструкций. К этой группе двигателей принадлежат: трехфазный компенсированный индукционный двигатель и синхронизированный индукционный двигатель. К сожалению, двигатели эти значительно дороже асинхронных и, в связи с наличием коллектора, уход за ними сложнее. Описание их можно найти в специальных курсах.

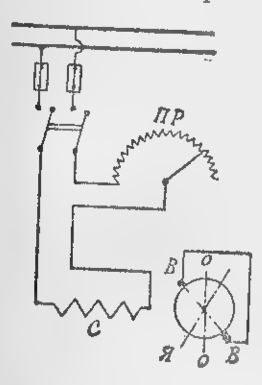


Рис. 81.

Электродвигатель, как рабочая единица, завоевал себе почетное место на фабриках, заводах, в мелких производствах и даже в домашнем обиходе. Он изготовляется самых разнообразных мощностей. Он наиболее удобен для установки в самых разнообразных положениях и в таких местах, где установка какого-либо другого двигателя представляется невозможной. Подвести к нему по проводам ток легче, чем подать пар к паровой машине или устроить сложную передачу от трансмиссионного вала. Обслуживание двигателя просто, как и управление, которое иногда возможно осуществлять даже на расстоянии. Электродвигатель легко приспособить для привода самых разнообразных механизмов, выбирая, смотря по месту, типы: открытый, полуоткрытый или совершенно закрытый, с вентиляцией или без вентиляции. Особенно ценен двигатель при работе с перерывами, когда он экономнее всякого другого двигателя.

Применение двигателей сильно сокращает промежуточные передачи с их валами, шкивами и ремнями и зубчатыми передачами. В результате — в помещении становится светлее, и работа делается менее опасной. Электрические приводы могут быть групповыми, когда один двигатель обслуживает через общую трансмиссию ряд станков, и одиночными, когда двигатель приводит в движение только один рабочий механизм. В последнем случае число передаточных механизмов сводится к минимуму. Вопрос о том, какой из приводов является более рациональным, приходится решать в каждом отдельном случае.

§ 50. Задачи.

1. Какую мощность в л. с. будет отдавать двигатель постоянного тока на вал, если при силе тока в 80 ампер и напряжении в цепи в 220 вольт он имеет коэффициент полезного действия $\varphi = 0,86$?

Двигатель потребляет $E \cdot I = 220 \cdot 80 = 17\,600$ W.

Двигатель отдает на вал $E \cdot I \cdot \eta = 17\,600 \cdot 0,86 = 15\,136$ W, что составляет $15\,136 : 736 = 20,57$ л. с.

2. Чему равен коэффициент полезного действия двигателя постоянного тока, если при силе тока в 64 ампера и напряжении сети в 220 вольт он развил на валу полезную мощность в 16,2 л. с.

Двигатель потребляет $E \cdot I = 220 \cdot 64 = 14\,080$ W.

Двигатель отдает на вал 16,2 л. с. или $736 \cdot 16,2 = 11\,923$ W.

Следовательно, к.п.д. (коэф. полезного действия) двигателя:

$$\eta = \frac{11\,923}{14\,080} = 0,846 \text{ или } 84,6\%.$$

3. Какой силы ток потребляет двигатель постоянного тока, если известно, что он отдает на вал 32 л. с. и что его коэффициент полезного действия при этой нагрузке равен 0,88, а напряжение в сети составляет 220 вольт?

Двигатель отдает на вал $736 \cdot 32 = 23\,552$ W.

Двигатель потребляет:

$$23\,552 : 0,88 = 26\,850 \text{ W}.$$

Отсюда сила тока, потребляемого двигателем:

$$I = 26\,850 : 220 \approx 122 \text{ A}.$$

4. Какова полезная мощность трехфазного асинхронного двигателя, если при к.п.д. 0,87, коэффициенте мощности 0,85 и напряжении 220 вольт он потребляет 88 ампер?

Потребляемая двигателем мощность, по формуле (55):

$$P = E \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{3} = 220 \cdot 88 \cdot 0,85 \cdot 1,73 \doteq 28\,500 \text{ W}.$$

Двигатель отдает на вал:

$$28\,500 \cdot 0,87 = 24\,700 \text{ W или } 24\,700 : 736 = 33,6 \text{ л. с.}$$

5. Трехфазный асинхронный двигатель при напряжении 440 вольт, коэффициенте мощности 0,86 и коэффициенте полезного действия 0,9 передает на шкив 50 л. с. Какова сила тока в двигателе?

Двигатель отдает на шкив $736 \cdot 50 = 36\,800$ W.

Двигатель потребляет $36\,800 : 0,9 = 41\,000$ W.

Согласно формуле (55), сила тока в двигателе:

$$I = \frac{P}{E \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{3}} = \frac{41\,000}{440 \cdot 0{,}86 \cdot 1{,}73} = 62{,}6 \text{ A.}$$

6. Трехфазный асинхронный двигатель работает при напряжении 220 вольт, коэффициенте полезного действия 0,88, силе тока 88 ампер и отдает на вал 35 л. с. Определить коэффициент мощности двигателя.

Двигатель отдает на вал 736·35 = 25 760 W.

Двигатель берет от сети 25 760 : 0,88 = 29 273 W.

Согласно формуле (55), коэффициент мощности:

$$\cos\varphi \cdot \frac{P}{E \cdot I \cdot \sqrt{3}} = \frac{29\,273}{220 \cdot 88 \cdot 1{,}73} = 0{,}875.$$

§ 51. Трансформаторы, выпрямители тока и преобразователи.

Все указанные приборы могут быть названы трансформаторами (преобразователями), но наименование «трансформаторы»

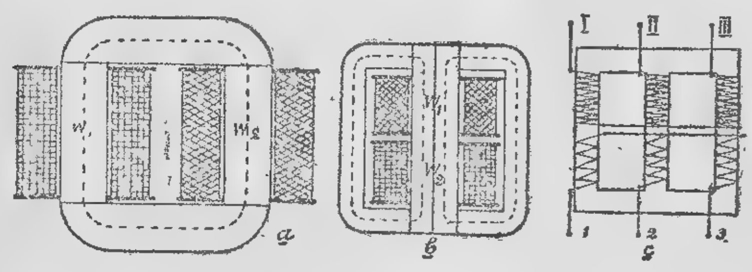


Рис. 82.

укоренилось за неподвижными трансформаторами, принцип действия которых был описан в § 32. На рис. 82 *a* и *b* показаны два однофазных трансформатора с обмотками W_1 и W_2. У одного из них магнитная цепь не разветвляется, у другого — идет по двум параллельным ветвям. Три однофазных трансформатора могут обслуживать в отдельности также и три фазы линии передачи трехфазного тока. В таком случае пользуются и специальным трехфазным трансформатором, схема которого показана на рис. 82*c*. В целях уменьшения потерь на гистерезис и токи Фуко, всю магнитную систему трансформоторов (как якорей динамомашин или статоров и роторов двигателей) изготовляют из специальных сортов мягкого листового железа. Вследствие нагрева током обмоток трансформаторов при большой их мощности, приходится специально заботиться об их охлаждении, так как естественного охлаждения их недостаточно. Трансформаторы охлаждают, создавая искусственный приток воздуха или заключая их

в кожухи, наполненные маслом. Если одной естественной циркуляции масла недостаточно, то масло охлаждают, помещая в верхней части кожуха змеевик с холодной водой или пропуская само масло через змеевик, помещенный в особом резервуаре с охлаждающей водой.

Рис. 83 и 84 дают изображение однофазного и трехфазного трансформаторов, в последнем случае без кожуха и с кожухом На рис. 85 изображен трехфазный трансформатор на 1000 киловольт-ампер, трансформирующий напряжение 60 000 на 25 000 вольт при 60 периодах. Сзади трансформатора мы видим стоящий отдельно его кожух, заполненный маслом. Получая тепло от обмоток, нагревшееся масло поднимается кверху, а холодное идет книзу. Для увеличения поверхности охлаждения кожуха, он снабжен с обеих сторон двумя рядами вертикальных трубок, по которым также циркулирует масло. Трансформаторы устанавливаются в специальных помещениях, которые тщательно вентилируются, чтобы в них не было застоя теплого воздуха.

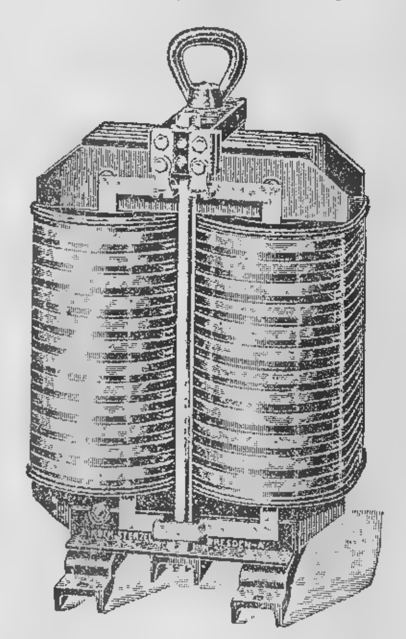


Рис. 83.

Если нужно преобразовать переменный ток одного числа периодов в переменный же ток, но другого числа периодов, то вместо трансформаторов прибегают к установке преобразователя *(умформера)*, состоящего из двух электрических машин: мотора и генератора, соединенных муфтой. Вообще такой системой, состоящей из мотор-генератора при соответствующем подборе машин, можно преобразовывать:

1) любой переменный ток одного напряжения и числа периодов в любой переменный ток другого напряжения и числа периодов;

2) переменный ток в постоянный и обратно;

3) постоянный ток одного напряжения в постоянный ток другого напряжения.

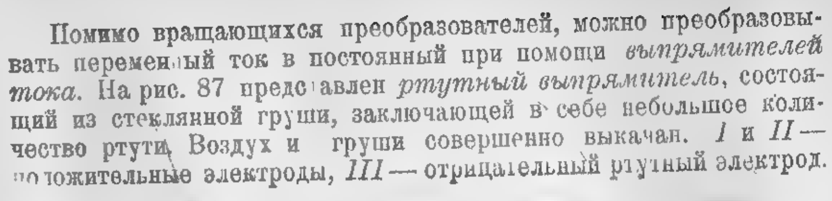
Существуют еще *каскадные преобразователи и одноякорные преобразователи*, применяемые на подстанциях, питающих постоянным током заводские и трамвайные установки. Постоянный

ток в этих преобразователях получается из переменного (обычно из трехфазного тока), при чем в одноякорных преобразователях установка состоит из одной машины постоянного тока, якорь которой, кроме коллектора, имеет и необходимое число колец, к которым и подводится переменный ток.

Так как между напряжениями постоянного и переменного тока в одном и том же якоре машины имеется строгая зависимость, то для получения в машине постоянного тока требуемого напряжения, к кольцам необходимо подвести переменный ток также определенного напряжения, обыкновенно не того, какое имеется в цепи. Поэтому напряжение цепи приходится, до подвода тока к кольцам, предварительно изменять при помощи трансформаторов. Одноякорные преобразователи называются обыкновенно *конверторами*. Преобразование в них можно производить как из постоянного тока в переменный, так и обратно.

Рис. 84.

На рис. 86 показана установка, состоящая из трехфазного синхронного мотора (сзади) мощностью на 750 л. с., 2200 вольт и динамо постоянного тока (спереди) на 500 киловатт, 250 вольт. Число оборотов мотор-генератора (агрегата, т. е. сочетания двух машин, работающих в качестве единого целого) — 500 в минуту.



Помимо вращающихся преобразователей, можно преобразовывать переменный ток в постоянный при помощи *выпрямителей тока*. На рис. 87 представлен *ртутный выпрямитель*, состоящий из стеклянной груши, заключающей в себе небольшое количество ртути. Воздух из груши совершенно выкачан. *I* и *II* — положительные электроды, *III* — отрицательный ртутный электрод.

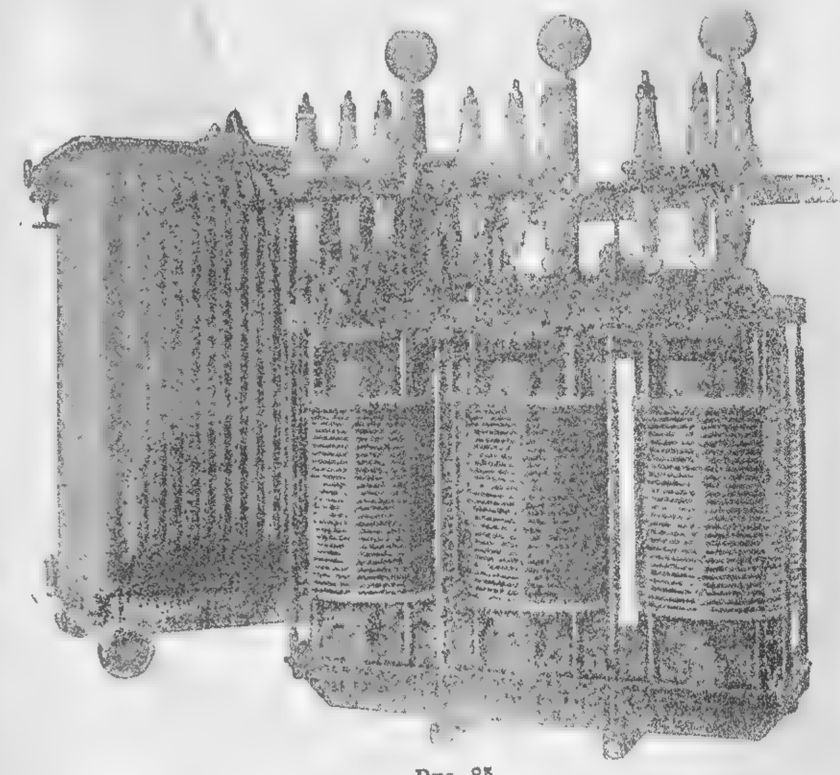


Рис. 85.

и рядом с ним *IV* — вспомогательный электрод, служащий для приведения выпрямителя в действие. Действие выпрямителя основано на том явлении, что переменный ток, поступающий в стеклянную грушу, заполненную парами ртути, может свободно проходить *только в одном направлении* — от твердого электрода к жидкому (от положительного полюса к отрицательному). Обе половины волны однофазного тока (кривая схемы *a* на рис. 87) текут по противоположным направлениям к анодам *I* и *II* и,

выходя через электрод *III*, дают в цепи аккумулятора выпрямленный ток (кривая схемы *b*). Катушки с самоиндукцией *u* деформируют обе полуволны, почему выпрямленный ток еще более приближается к типу постоянного (кривая схемы *c*). Выпрямители со стеклянными грушами строятся на небольшое число ампер (от 5 до 200) и могут быть использованы на небольших установках, например, для зарядки аккумуляторов, для проекционных фонарей и прожекторов.

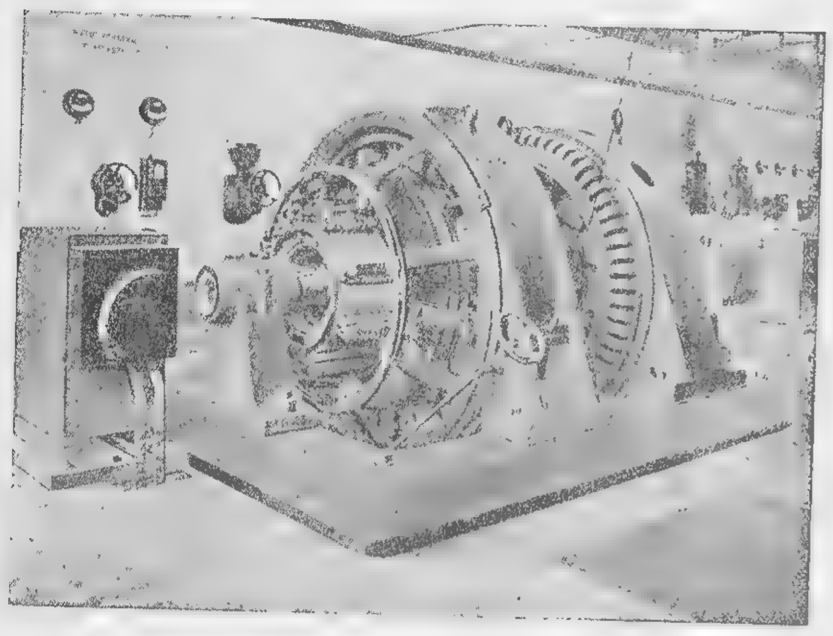


Рис. 86.

Выпрямители строятся с питанием током не только от однофазных (при малых мощностях), но и от трехфазных сетей переменного тока (при больших мощностях). В выпрямителях на большую мощность вместо стеклянной груши применяют железные сосуды. С помощью их работают за границей и у нас многие сети электрических железных дорог и городских трамваев.

Вытеснение ими вращающихся преобразователей станет понятно, если мы рассмотрим их сравнительные коэффициенты полезного действия, подсчитанные для установок в 500 киловатт при нагрузках в 100, 75, 50 и 25% от нормальной.

Коэффициенты полезного действия при нагрузках:

	100%	75%	50%	25%
1. Мотор-генератор без трансформатора	84,5	85,0	82,0	72,0
2. Каскадный умформер без трансформатора	90,5	90,5	89,0	8 .0
3. Конвертер с трансформатором	91,5	92,0	90,5	82,5
4. Ртутный выпрямитель с трансформатором	94,2	94,3	94,3	92,0

Для весьма мелких устройств, в частности для зарядки аккумулятора от сети переменного тока у себя на дому, можно пользоваться

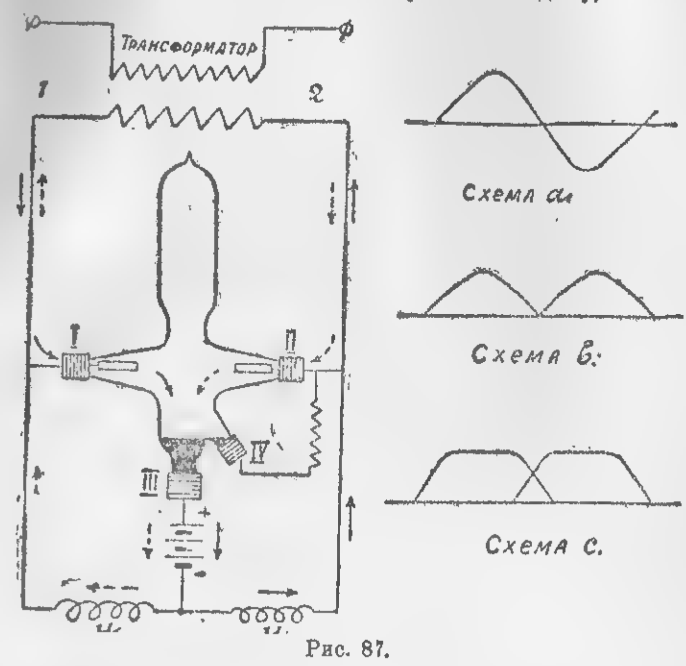


Рис. 87.

алюминиевым выпрямителем Греца, представленным на рис. 88, где означают: *CC* — стеклянные сосуды с насыщенным раствором соды и с электродами *C* из свинца и *A* из алюминия, *Ак* — аккумулятор, включенный для зарядки, *ЛР* — ламповые реостаты, один для регулирования тока в аккумуляторе, другой для приведения выпрямителя в действие. В домашней обстановке можно обойтись без последнего. Действие прибора, как ртутного выпрямителя, основано на прохождении тока в содовом растворе лишь в одном направлении — от свинца к алюминию.

Условия исправной работы алюминиевого выпрямителя — чистота составных его частей: электродов и электролита. Если выпрямитель строится для длительной работы, его полезно охлаждать, ставя сосуды в бак с проточной водой.

Рис. 88

Кроме ртутного и алюминиевого выпрямителя, существуют различных конструкций механические выпрямители, в которых выпрямление производится от переключателей, действующих от электромагнитов, и применяемые в радиоприемных установках кенотронные выпрямители.

Наличие жидкости в алюминиевом выпрямителе является его большим недостатком. В настоящее время вместо таких выпрямителей начинают применять «сухие» выпрямители. Так как изготовление их намечается и у нас, дадим краткое описание выпрямителя «Протос» фирмы Сименс-Шуккерт. Действие таких выпрямителей основано на способности пропускать ток в одном направлении у элемента, созданного из трех составных частей: алюминиевого электрода, препарата из закиси меди и металлической пластины, например, из амальгамированного свинца. Как и в выпрямителе Греца, ток идет здесь от свинца к алюминию. Открытие это было сделано Павловским в Вене еще в 1903 году. В результате последующих работ в этом направлении появился

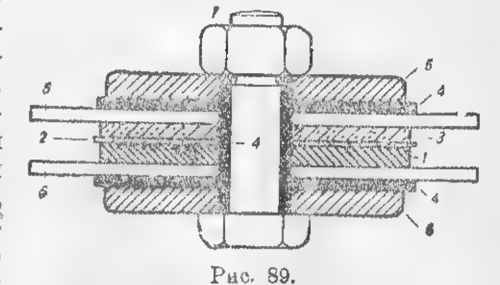


Рис. 89.

выпрямитель Протос, описанный в иностранной литературе лишь в 1929 году и состоящий из медной пластины, покрытой закисью меди, и свинцовой пластины. Как они смонтированы, видно из рис. 89, на котором показаны: *1* — медная пластина, *2* — слой закиси меди, *3* — свинцовая пластина, *4* — изоляционные прослойки, *5* — охлаждающие пластины, *6* — зажимные пластины, *7* — крепительный болт, изолированный от рабочей части изоляционной трубкой. Схема включения таких элементов, подобная включению элементов Греца, показана на рис. 90, на котором имеем: *1* — штепсельную вилку, *2* — трансформатор, *3* — переключатель в цепи вторичной обмотки трансформатора, *4* — собственно выпрямитель (состоит из четырех элементов), *5* — зажимы постоянного тока. В каждом плече включается последовательно по несколько элементов в зависимости от того, какое рабочее напряжение требуется в сети постоянного тока, считая на каждый элемент по 2 вольта. Сила тока на каждый элемент составляет около 0,25 ампера. Поэтому при больших силах тока элементы приходится соединять по несколько штук параллельно. Коэффициент полезного действия выпрямителя составляет свыше 50%, т. е. выше мелких выпрямителей других типов, имеющихся на практике, включая ртутные.

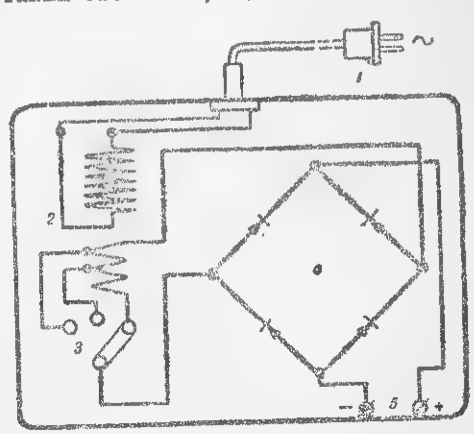


Рис. 90.

§ 52. Вопросы для повторения.

1. На каком принципе основано действие электродвигателей?
2. В чем состоит закон Био и Савара? Чему он учит?
3. Как разделяются по способу возбуждения двигатели постоянного тока, каковы свойства этих двигателей и какова область их применения?
4. Как регулируется скорость в шунтовом и последовательном двигателях постоянного тока?
5. Зарисовать установочные схемы для двигателей-сериес и шунтового и объяснить назначение пусковых реостатов?
6. Как переменить направление вращения в двигателе постоянного тока?

7. Что такое синхронный двигатель и каковы его особенности?

8. На каком принципе основано действие асинхронных двигателей трехфазного тока? Что такое „скольжение"?

9. Как устроен асинхронный трехфазный двигатель?

10. Зарисовать ус ановочные схемы асинхронного двигателя трехфазного тока — короткозамкнутого и с фазным ротором?

11. Как переменить направление вращения в трехфазном асинхронном двигателе?

12. Какие особенности однофазного асинхронного двигателя?

13. Какие коллекторные двигатели находят применение в переменном токе?

14. Какими способами можно улучшить в установке коэффициент мощности?

15. Как устроены трансформаторы?

16. Как устроены вращающиеся преобразователи? В каких случаях они применяются?

17. Что такое умформер?

18. Как действуют ртутные выпрямители, какова их конструкция, где они применяются?

19. Как устроен, как действует и где применяется алюминиевый выпрямитель?

20. Какие еще применяются выпрямители?

§ 53. Закон Фарадея. Химические действия тока.

Электрический ток производит химические действия, которые имеют большое значение как в науке, так и для практического применения. При прохождении тока через металлы и уголь, таковые нагреваются. При прохождении же токов через жидкости, последние разлагаются по вполне определенным законам. Это явление разложения называется *электролизом*, жидкости — *электролитами*, пластинки или проволоки, по которым поступает ток в жидкость,— *электродами*. При пропускании тока через воду, подкисленную для улучшения проводимости, на аноде (положительном электроде) выделяется кислород, на катоде (отрицательном электроде) — водород.

При пропускании тока через различные растворы солей, на катоде осаждается в чистом виде металл, остальные же продукты разложения выделяются на аноде.

Фарадей показал, что при прохождении тока через электролит один кулон электричества или ампер за одну секунду выделяет всегда одно и то же количество разложенного током вещества. Это количество вещества, приходящееся на единицу тока в единицу времени и выраженное в миллиграммах, называется *электрохимическим эквивалентом* данного вещества и для отдельных веществ имеет следующие значения:

Медь	0,328	Золото	0,681
Никель	0,304	Серебро	1,1183

Отсюда, если мы имеем ток силою I ампер и если электрохимический эквивалент обозначим буквой a, то за время t секунд, количество выделившегося из данной жидкости вещества в миллиграммах может быть определено, согласно закону Фарадея, по формуле:

$$Q = a \cdot I \cdot t, \tag{58}$$

показывающей, что количество выделившегося при разложении вещества в миллиграммах прямо пропорционально электрохимическому эквиваленту этого вещества и количеству электричества в кулонах (ампер-секундам).

Научные исследования электролиза пролили свет на вопрос о природе электричества и подтверждают принятую в науке теорию электронов, как носителей электричества. Наукой даже подсчитано, что каждый электрон имеет весьма малый заряд, равный $\frac{1,59}{10^{19}}$ кулона, так называемый элементарный заряд наименьшего неделимого количества электричества.

Практика электролиза привела к гальванотехнике, т. е. к искусству при помощи электрического тока («гальваническим» путем) создавать различные модели помощью особых форм, на которых металл осаждают электролизом, или же просто покрывать металлом предметы, изготовленные из какого-либо металла или другого вещества. В первом случае мы будем иметь дело с гальванопластикой, во втором случае — с гальваностегией, хотя на практике часто и те и другие работы относят к гальванопластике, понимая ее таким образом несколько шире. Практику покрывания металлическими осадками поверхностей предметов при помощи электролиза применил впервые в 1837 — 38 году русский ученый академик Якоби (1801 — 1874). В настоящее время электрическим током серебрят, золотят, обмедняют и т. д. Обмеднение, имея определенный рецепт раствора, можно выполнить, например, так искусно, что предмет будет иметь зеленоватый оттенок. Искусство гальванопластики доводят до того, что серебрят и золотят даже фрукты, покрывая их тончайшей металлической оболочкой, воспроизводящей до мельчайших подробностей все, даже нежнейший пушок плода. Точно так же покрывают блестящей оболочкой насекомых, цветы, растения. Для техники всего важнее процесс никелирования. В жизненном обиходе нам постоянно приходится иметь дело с предметами, покрытыми никелем, предохраняющим их от ржавчины (самовары, дверная и оконная арматура и т. д.).

За последние двадцать лет образовалась особая отрасль прикладной техники — электрохимия. Путем электрохимических процессов удалось получить свободную от посторонних примесей

(рафинированную) медь и алюминий. Добытая электролитическим путем медь благодаря своей хорошей проводимости вытесняет остальные сорта меди при изготовлении электрических проводов и кабелей. Металл алюминий в чистом виде сделался доступным лишь благодаря электрохимии и также пошел на изготовление электрических проводов. Для получения алюминия из глины сооружается у нас специальный завод близ Волховской гидроэлектрической станции. Электролиз применяется также для рафинирования (очистки) цинка, свинца, золота, серебра.

§ 54. Гальванические элементы и аккумуляторы.

Химические действия тока имеют место в гальванических элементах и аккумуляторах. Энергия *в гальванических элементах* получается обыкновенно за счет дорого стоящего цинка, почему этими элементами пользуются лишь в установках, требующих расхода тока малыми количествами, когда всякая другая установка все-таки обошлась бы дороже. Кроме того некоторые из элементов выделяют вредные газы, что, конечно, только затрудняет пользование ими.

В нашей практике наибольшее распространение имеют элементы Лекланше, мокрые и сухие (звонки и телефоны), и Мейдингера (телеграфия). В элементе Лекланше отрицательным электродом служит цинковая палочка или изогнутая в цилиндр пластина, положительным — угольный брусок или стержень. Активной жидкостью является нашатырь, или хлористый аммоний. Выделяющийся при химической реакции водород обволакивает уголь и ухудшает действие элемента, вызывая явление поляризации электродов, при чем возникает электродвижущая сила, противоположная действию основной э.д.с. элемента. Чтобы противодействовать этому положительный электрод окружают смесью двуокиси марганца и толченого кокса с графитом в брусках или в холстяном мешочке. Двуокись марганца служит в элементе деполяризатором, противодействуя поляризации. Если к раствору нашатыря прибавить немного глицерина и хлористого водорода, то усыхание жидкости замедлится, и не будет происходить кристаллизация нашатыря на электродах и деполяризаторе. Как на один из лучших рецептов для изготовления возбудительной жидкости, можно указать на следующий состав: 10 ч. воды, 1 ч. хлорист. аммония, 1 ч. хлористого цинка, 0,1 ч. хлористого натрия и 0,01 хлористого водорода. Деполяризатор составляют из следующих частей: 5 — двуокиси марганца, 3 — толченого кокса и 1 — графита. Элемент с цинковым цилиндром и большего размера лучше, чем с цинковой палочкой или малых размеров,

так как в первом случае внутреннее сопротивление элемента меньше, а срок его службы больше. Э.д.с. в обоих случаях одинакова и равна 1,4 вольта.

Сухой элемент Лекланше представляет собою герметически закрытую коробку, изготовленную из цинка и служащую отрицательным электродом. Составы деполяризующей массы и возбудительной жидкости несколько отличаются от составов, применяемых в жидких элементах. Так в элементы прибавляют глицерин — чтобы уберечь его от усыхания, массу загущают гипсом, мукой, опилками и т. д., чтобы исключить возможность выливания жидкости. Э.д.с. сухого элемента Лекланше — 1,5 вольта (см. таблицу I).

Если элементы Лекланше можно самому собрать, зарядить активной жидкостью и установить у себя на квартире, то все эти операции не всегда представляется возможным выполнить в отношении аккумуляторов, приборов, способных накоплять, или аккумулировать электрическую энергию, сохранять ее и отдавать по мере надобности, так как они по своему устройству сложнее и требуют при обращении соблюдения ряда правил.

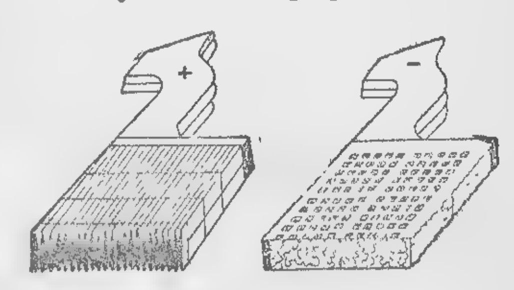


Рис. 91.

История аккумулятора связана с именами их изобретателя, французского физика Планте (1834 — 1889), в 1872 г. построившего первый *свинцовый аккумулятор*, пригодный для технической практики, и его ученика Фора, облегчившего и ускорившего процесс изготовления свинцовых пластин для аккумуляторов. Наши современники, американец Эдисон и швед Юнгнер, к *свинцовым аккумуляторам* прибавили еще так называемые *щелочные аккумуляторы*.

Конструкция пластин свинцовых аккумуляторов довольно разнообразна, но чаще всего в качестве положительного электрода применяется так называемая поверхностная пластина (Планте), а отрицательного — массовая (Фор). В поверхностной пластине мы имеем очень большую действующую поверхность от того, что материалом для нее служит не гладкий свинец, а рифленый, с значительными углублениями; в массовой пластине значительная активность достигается вмазыванием в ячейчатые свинцовые решетки тестообразной массы из свинцового глета, замешанного

в растворе серной кислоты (рис. 91). В стеклянный сосуд или эбонитовый, или из смолистой сосны, в последнем случае обложенный внутри свинцом, на который не действует серная кислота, ставится нечетное число пластин, не менее трех, так, чтобы с обеих сторон крайними приходились отрицательные пластины. Все положительные и все отрицательные пластины в отдельности соединяются в каждом сосуде параллельно, и самый сосуд заполняется раствором чистой, специальной аккумуляторной серной кислоты определенной плотности (уд. вес от 1,18 до 1,25). Если такой аккумулятор подвергнуть действию постоянного тока от постороннего источника, в нем будут происходить химические реакции, и через некоторое время элемент, как говорят, зарядится, при чем электрод, соединенный с положительным полюсом заряжающего источника, в аккумуляторе в свою очередь будет служить положительным полюсом. Заряженный аккумулятор самостоятельно может работать на внешнюю цепь и давать ей ток. Когда он разрядится до известного предела, необходимо, присоединяя его к постороннему источнику постоянного тока, снова зарядить аккумулятор и т. д. Для каждой величины пластин и, значит, для каждого аккумулятора существуют максимальная зарядная и разрядная силы тока, указываемые аккумуляторным заводом. Зарядка несколько большей силой тока не вредит им, но если они заряжаются и разряжаются силой тока, не выше указанной изготовившей их фирмой, они служат дольше. При условиях нормальной разрядки аккумулятор долгое время имеет напряжение в 1,95 вольта и затем постепенно понижает до 1,8 вольта. Тогда разрядку аккумулятора нужно прекратить и снова его зарядить. В каталогах фирм для каждого аккумулятора указывается его *емкость* в *ампер-часах* и нормальный ток при заряде и разряде. Так, если емкость батареи равна 16 ампер-часам, при силе зарядного или разрядного тока в 1,6 ампера, то значит, при разрядке этим током батарея будет работать 16 : 1,6 = 10 часов. При разрядке током меньшей силы продолжительность работы аккумулятора соответственно увеличится. Количество ампер-часов, которое приходится тратить на зарядку, всегда больше ампер-часов разрядки. Последние обыкновенно составляют около 0,85 от первых (так называемая количественная отдача). Разумеется и отдаваемая аккумулятором энергия в киловатт-часах будет меньше получаемой при заряде энергии в этих же единицах и составляет только 0,7—0,8 первой (рабочая или промышленная отдача). Если на аккумуляторе нет ярлыка фирмы, то ток, который он может дать, можно приблизительно подсчитать, зная, что в среднем с 1 кв. дм поверхности положительной пластины получают около 1 ампера (плотность тока). Так как напряжение

каждого аккумуляторного элемента при разряде меняется в пределах от 2,1 до 1,8 вольта, то для получения напряжений, требуемых на практике, приходится соединять элементы последовательно. В среднем напряжение аккумуляторного элемента считается равным двум вольтам. На рис. 92 мы видим три соединенных последовательно элемента, в каждом из которых показано по 3 положительных и по 4 отрицательных пластины. Напряжение такой батареи составит 6,3—5,4 вольта. Если каждая боковая поверхность положительной пластины составляет 2 кв. дм, то при трех положительных пластинах в каждом сосуде имеем ток от батареи в $2 \times 2 \times 3 = 12$ ампер.

В *щелочных аккумуляторах* электролитом служит 21°/$_0$-ный раствор едкого кали. Положительным электродом в аккумуляторах Эдисона является гидрат окиси никеля, впрессованный в небольшие пакетики из перфорированной никелевой стали, заделанные в легкую раму из этого же материала, отрицательным электродом — окись железа с примесью ртути, взятой для увеличения проводимости. Таким образом, аккумулятор Эдисона может быть назван железоникелевым. Шведский электротехник Юнгнер совершенно самостоятельно и одновременно с Эдисоном изобрел кадмиевоникелевый аккумулятор, электроды которого также находятся в растворе едкого кали. Э.д.с. щелочных аккумуляторов ниже, чем свинцовых (в среднем 1,23 вольта при разряде и 1,73 при заряде), ниже также количественная (0,72) и промышленная отдача (0,55); кроме того, явление саморазряда в щелочных аккумуляторах более дает себя чувствовать, чем в свинцовых, хотя в новейших конструкциях в этом отношении достигнуты значительные улучшения. С другой стороны, щелочные аккумуляторы не боятся тряски, перегрузки, усиленной работы, вообще менее требовательны в эксплоатации и безвредны для здоровья обслуживающего их персонала. Электролит в них почти не затрачивается. Неудивительно, поэтому, что область их применения все более и более расширяется.

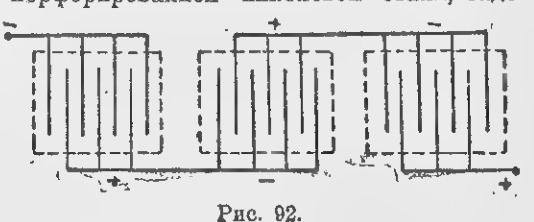


Рис. 92.

Аккумуляторы нашли в технике самое широкое применение. Их можно встретить на осветительных станциях *постоянного* тока, где они берут на себя *пики* (верхушки) нагрузок, когда мощность работающих машин является уже недостаточной (рис. 93), а пускать еще одну машину на короткий промежуток невыгодно;

они берут на себя ночную нагрузку, когда машины выгоднее остановить, а остальные часы заряжаются от машин, заставляя их работать с повышенной нагрузкой и, следовательно, с более высоким коэффициентом полезного действия. На трамвайных и заводских станциях постоянного тока с сильно колеблющейся нагрузкой они работают все время параллельно с машинами (*буферные батареи*), принимая от них зарядный ток в те мо-

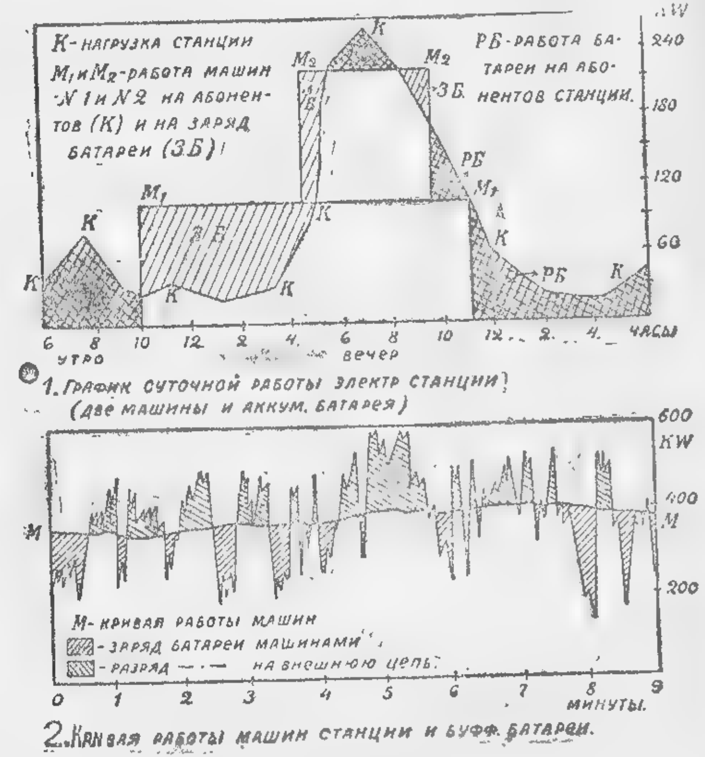


Рис. 93.

менты, когда потребность в токе со стороны приемников ниже вырабатываемой машинами мощности, и помогая им, когда эта мощность отстает от потребности приемников в электрической энергии (рис. 93). Таким образом и тут основной источник тока работает в наивыгоднейших условиях, а батарея принимает на себя нагрузочные толчки.

Аккумуляторы, кроме электрических станций, применяются для движения электромобилей, электротележек, подводных лодок,

для освещения вагонов, автомобилей и др. экипажей, для зажигания в двигателях внутреннего сгорания, для телефонных и телеграфных целей (как источник тока на станциях), в сигнализациях, в частности в пожарной сигнализации, в лабораториях, в радиоустановках, в мелких карманных фонариках и т. д. Кроме электромобилей, можно встретить небольшие моторные лодки отдельные трамвайные и ж.-д. вагоны с аккумуляторной тягой, наконец, на электрических железных дорогах — на второстепенных, маневровых и товарных путях, где не протянут воздушный провод для питания электровозов, применяют теперь электровозы с аккумуляторной тягой.

§ 55. Задачи.

1. Динамомашина, работающая на электродвигатель, развивает э.д.с. 115 вольт. Определить обратную э.д.с. мотора, если сопротивления динамо, соединительных проводов и мотора составляют 0,2, 0,04 и 0,22 ома, а сила тока, потребляемого двигателем, составляет 20 ампер.

Э.д.с. машины расходуется на преодоление всех омических сопротивлений цепи при прохождении по ним тока в 10 ампер и обратной э.д.с. мотора.

На основании этого пишем:

$$115 = 0,2\ 10 + 0,04 \cdot 10 + 0,22 \cdot 10 + e,$$

откуда искомая величина:

$$e = 115 - 2 - 0,4 - 2,2 = 115 - 4,6 = 110,4\ V.$$

2. В серебряной ванне за 2 часа было потрачено на серебрение 144 мг чистого серебра. Определить силу пропускаемого через ванну тока.

На основании формулы (58) находим:

$$I = \frac{Q}{a \cdot t} = \frac{144}{1,1183 \cdot 7200} \cong 0,018\ A.$$

3. Требуется отникелировать наружную поверхность зажигалки слоем 0,03 мм. Определить, какое количество потребуется для этого никеля и какое количество времени, если операцию никелирования производить током в 0,18 ампера и если поверхность зажигалки, подлежащая обработке, составляет 30 кв. см.

Потребный объем никеля 0,03 · 3000 = 90 куб. мм = 0,9 куб. см, что при удельном весе никеля в 8,3 даст 0,747 г или 747 мг.

На основании формулы (58) имеем:

$$t = \frac{Q}{a \cdot I} = \frac{7476}{0,304 \cdot 0,18} \cong 13\,651 \text{ сек.} \cong 3 \text{ час. } 47 \text{ мин. } 31 \text{ сек.}$$

4. Определить число элементов, емкость и силу разрядного тока аккумуляторной батареи, необходимой для непрерывного питания в течение 10 часов 20 металлических 16-свечных ламп накаливания, потребляющих каждая 0,18 ампера при напряжении 110 вольт.

Так как минимальное напряжение элемента составляет 1,8 вольта то число последовательно соединенных элементов должно быть:

$$110 : 1,8 = 61.$$

Потребный ток для лампочек $I = 0,18 \cdot 20 = 3,6$ А.

Емкость батареи в ампер-часах: $3,6 \cdot 10 = 36$.

5. Для никелирования предполагается установить в мастерской специальную динамомашину постоянного тока напряжением 6 вольт силою тока 21 ампер. Определить мощность двигателя, необходимого для вращения данной динамомашины, если двигатель и динамо посажены на один вал (соединены муфтой) и если коэффициент полезного действия динамомашины составляет 0,7.

Мощность динамомашины:

$$P = 6 \cdot 21 = 126 \text{ ватт}.$$

От двигателя для динамомашины требуется мощность:

$$P_1 = \frac{P}{\eta} = \frac{126}{0,7} = 180 \text{ ватт}$$

или в лош. силах:

$$N = 180 : 736 \cong 0,25 \text{ л. с.}$$

§ 56. Вопросы для повторения.

1. Что такое электролиз, электролиты и электроды?
2. В чем состоит закон Фарадея о химических действиях тока?
3. Что такое электрохимический эквивалент?
4. Что такое гальванотехника, гальванопластика и гальваностегия?
5. С чьим именем связано применение на практике гальванотехники?
6. Чем занимается электрохимия?
7. Что такое гальванический элемент? Как устроены элементы Лекланше — мокрый и сухой?
8. Как устроен аккумулятор?
9. Что такое емкость и отдача аккумулятора?
10. Какие составные части щелочного аккумулятора?
11. Дать сравнительную характеристику свинцовых и щелочных аккумуляторов?
12. В каких случаях применяются аккумуляторы? В частности, с какой целью их применяют на электрических станциях постоянного тока?

§ 57. Термоэлементы.

Еще немецким физиком Зеебеком (1805—1849) было отмечено возникновение тока в местах соприкосновения двух металлов, если эти металлы разнородны, спаяны и места спаек поддерживаются при различных температурах. Дальнейшие опыты показали, что возникающая при этом э.д.с. весьма мала, так как измеряется лишь миллионными долями вольта (микровольтами) и зависит не от величины элемента, а от свойств сращенных металлов и от разницы температур между

обоими местами спайки. Так, в железоникелевой паре при разности температур в 200° С получается э.д.с. лишь в 5,866 милливольт. Для получения напряжения в размере 110 вольт потребовалось бы, следовательно, большое число последовательно соединенных термоэлектрических пар, но так как внутреннее их сопротивление велико, то работать на таком источнике было бы невыгодно (отдача составляет около 1%). Кроме того, металлы или сплавы, которые можно было бы применить с большей выгодой, чем другие, оказываются непрочными и непригодными для тех высоких температур, с которыми приходится иметь дело.

Ввиду описанных недостатков термоэлементов они нашли применение лишь для весьма узких целей — в области измерения температур, и в этой области они не имеют себе конкурентов. Термоэлементы, служащие для измерения высоких температур, называются термоэлектрическими пирометрами. Так, термоэлемент из платины и родиевой платины (платина с примесью от 5 до 10% родия) дает возможность измерять температуры до 1600° С. Проволоки обоих этих металлов заключены в фарфоровую или кварцевую трубку, конец которой и вводят в печь, температуру которой нужно определить. С другого конца трубки имеются свободные концы проводников, которые присоединены к вольтметру, градуированному не на вольты, а непосредственно на шкалу Цельсия, и потому по этому прибору можно отсчитать не э.д.с. термоэлектрической пары, а непосредственно ту температуру, от которой эта э.д.с. зависит.

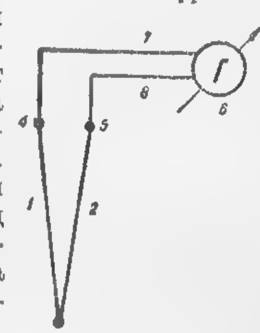


Рис. 94.

На рис. 94 представлена электрическая часть пирометра: *1* и *2* — проводники термопары, *3* — место их спая, *4* и *5* — зажимы для присоединения прибора, *6* — гальванометр, градуированный на градусы Цельсия, *7* и *8* — соединительные проводники.

§ 58. Тепловые и световые действия тока.

Если в термоэлементах происходит в весьма невыгодных условиях преобразование тепловой формы энергии в электрическую, то обратное преобразование электрической энергии в тепловую происходит в несравненно более выгодных условиях, в ряде специальных электрических приемников. Сюда следует прежде всего отнести всевозможные *нагревательные приборы*, применяемые для отопления и варки, в которых используется нагревание током проводни-

ков большого сопротивления. Нам известно, что во всяком проводнике при прохождении по нему тока выделяется некоторое количество тепла, определяемое по закону Джоуля (§ 23), каковое и может быть использовано для нагревания помещений, варки пищи, кипячения воды и других целей (клееварки, электрические паяльники, аппараты для клеймения, утюги и т. д.). Существующие тарифы на электрическую энергию, к сожалению, не позволяют широко пользоваться электрическими нагревательными приборами в домашнем обиходе, и потому у нас пока они только начинают распространяться. Несомненно, что изменение в тарифах, на которое в отношении так называемой „бытовой нагрузки“ отдельные станции уже идут, даст сильный толчок к распространению этих приборов в домашнем быту. Они гигиеничнее и безопаснее, просты в обращении и всегда готовы к работе, чего нельзя сказать про наши кухонные плиты, круглые печи и керосинки. Во сколько обходится пока хотя бы кипячение воды электричеством, можно судить из задачи № 4 § 27.

Из нагревательных приборов в настоящее время обычно пользуются лишь такими, в которых есть настоятельная потребность в технике. Так, например, большое распространение имеют электрические паяльники, которые можно встретить во всех крупных мастерских и на заводах, имеющих дело с ремонтом электрических приборов и аппаратов. Встречается также электрическая посуда для варки клея, плавки сургуча (в почтамтах, в банках и учреждениях, принимающих на хранение драгоценности).

Различного рода нагревательные приборы изготовляются и у нас в республике. Так, завод «Электрик» в Ленинграде поставляет чайники, утюги, кастрюли, паяльники, плитки, клееварки, печи для отопления помещений, электрические нагреватели заклепок, электрогравировальные аппараты, соляные закалочные печи и т. п. В таблице XIV (стр. 159) мы приводим данные потребной мощности для ряда нагревательных приборов и в таблице XV (стр. 160) — расход энергии в ваттчасах на различные операции по нагреванию.

Кроме мелких случаев использования тепловых действий тока, надлежит указать на применение электрического тока в металлургии и на электрическое соединение (сварку) металлов. В так называемых *электрических печах* металлурги получают алюминий и его сплавы, приготовляют карбиды кальция, сплавы железа с хромом, марганцем, сталь и другие металлы. Применяемые для этой цели печи существуют двух типов: *электродные* и *индукционные*. В печи с электродами теплота развивается от прохождения тока через сопротивление, образованное целиком или отчасти телом, подвергающимся обра-

Таблица XIV.

Нагревательные приборы	Потребная для них мощность (ватты)
Плиты для нагревания	от 275 до 1000 ватт
Чайники	„ 330 „ 660 „
Кофейники	„ 220 „ 550 „
Самовары	„ 220 „ 2200 „
Кипятильники	„ 385 „ 715 „
Кастрюли, сковороды	„ 275 „ 2000 „
Утюги	„ 220 „ 550 „
Паяльники	„ 165 „ 330 „
Клееварки	„ 220 „ 880 „
Котелки для расплавления сургуча	„ 275 „ 495 „
Электрические печи (радиаторы)	„ 550 „ 5500 „

ботке и находящимся между электродами. На рис. 95*a* ток дается только в электроды *Э* печи, тепло от вольтовой дуги переходит на ниже находящийся металл, подлежащий плавке. В индукционной электрической печи теплота развивается вследствие прохождения через сопротивление, представляемое самим обрабатываемым телом, переменного тока (однофазного или трехфазного), индуктированного в этом теле, как во вторичной обмотке трансформатора. На рис. 95*b* ток дается в первичную обмотку *I* трансформатора печи. Во вторичной обмотке *II*, составленной всего лишь из одного замкнутого на себя витка из металла в тигле, при малой э.д.с. получается большой силы ток, тепло которого и производит требуемую работу. Как на пример можно указать, что в настоящее время существует в мире более 30 патентованных систем электрических дуговых и индукционных печей, применяемых в электротермическом производстве одной только стали, при чем этих печей в мире установлено свыше 1000 (в том числе 15 — в СССР). Емкость отдельных печей доходит до 10, 25, 40 и 60 т.

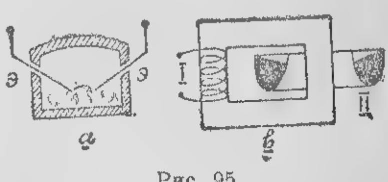


Рис. 95.

Таблица XV.

Примерный расход электрической энергии нагревательными приборами	Ватт-часы
1 л воды нагреть от 8° до вскипячения	118—120
4 чашки кофе приготовить	64—80
1 л супа сварить	210—230
1000 г рыбы сварить	285
1500 г говядины сварить	320
1000 г тушеного мяса в закрытой кастрюле приготовить	315
600 г картофеля зажарить	150
1 кочан цветной капусты сварить .	350
4 котлетки приготовить	120
6 яиц сварить — в смятку, в мешечке, вкрутую	36—48—60
1 час работы утюгом (без перерыва)	360

Мы остановились на стали потому, что спрос на электросталь и экономичность электроплавки вызвали широкое ее развитие. Не только инструментальная сталь и стальное литье, не только ответственные конструкционные сорта для нужд машиностроения и военных целей стали выплавляться в электрической печи, — но из электростали готовят в Америке рельсы, проволоку, листовое железо и пр.

Для электрического соединения *(сварка, спайка)* металлов пользуются как теплом, выделяемым в металле при прохождении по нему тока, так и теплом вольтовой дуги. Так, два плотно прижатые листа *a* и *b* (рис. 96*a*) можно сварить, если через электроды *Э* пропустить ток низкого напряжения (1-2 вольта), но большой силы (до 50 000 ампер и более), в зависимости от толщины свариваемых листов. Для сварки по такому способу (Томсона) в качестве источника тока служит трансформатор со вторичной обмоткой из нескольких витков толстой проволоки. На рис. 96*b* показана заварка трещины в металлической плите по способу Бенардоса. От зажимов *I — II* ток подводится к самой плите и к угольному электроду *Э*. Место, подлежащее заварке,

тщательно очищается и, если это необходимо, заполняется кусочками металла. При сварке между угольным электродом и плитой получается дуга, которая плавит металл и заливает щель.

При сварке по способу инженера Славянова, вместо угля, в качестве подвижного электрода берут стержень из того же металла, который подвергается сварке. Температура в этом случае получается ниже, почему обрабатываемый металл не рискует быть пережженным, а жидкий металл электрода хорошо заливает все пустые пространства. Двумя последними способами не только заливают раковины, трещины и т. д., но приливают отломанные части, пополняют изношенные поверхности и пр. Насколько прочны соединения, получаемые путем электрической сварки или спайки, можно видеть из следующих сравнительных данных, относящихся к опыту над разрывом планок, соединенных между собой пятью различными способами, представленными на рис. 96*c*. Сопротивления разрыву получились такие: 1) сварка контактная и дуговая — 22 800 кг, 2) сварка дуговая — 16 800 кг, 3) сварка дуговая и заклепки — 15 900 кг, 4) сварка контактная — 12 700 кг и 5) заклепочное соединение — 5900 кг. Результаты говорят исключительно в пользу электрической сварки. Конечно, место, подлежащее электрической сварке, должно быть тщательно очищено от ржавчины, окалины и грязи. Хотя на эти операции и требуется известное время, тем не менее, по произведенным опытам выходит, что полное время потребное для сварки известного количества мест равняется $^1/_4$—$^1/_5$ того времени, какое потребно на постановку соответствующего количества заклепок. Применяя сварку металлических конструкций вместо их склепки можно кроме того сэкономить до 25 — 30% материала.

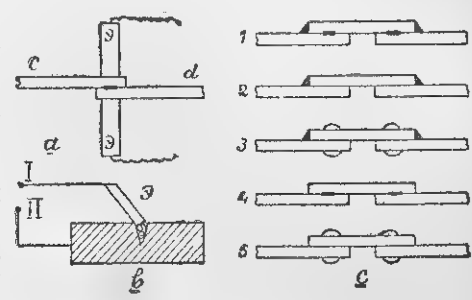


Рис. 96.

Для производства сварочных работ вольтовой дугой применяются специальные сварочные машины, обычно постоянного тока, и трансформаторы, для сварки точками (рис. 96-*a*) и в стык — специальные аппараты с трансформаторами. Изготовление необходимой аппаратуры для сварки выполняет у нас завод в Харькове и завод «Электрик» в Ленинграде.

Тепловыми свойствами тока пользуются в *плавких предо-*

хранителях, которые плавятся при прохождении через них тока недопустимо большой (для провода) силы и, таким образом, размыкают провода, предохраняя сеть или электрическую установку от порчи. Если по какой-либо причине по проводам пойдет ток выше назначенной для них нормы, они нагреваются, изоляция их может загореться. В лучшем случае она будет тогда попорчена, и провод придется сменить. Если перегруженные сверх нормы электродвигатель или динамомашина долгое время будут иметь дело с током значительной силы, они также могут выйти из строя. Для того, чтобы предохранить части электрических устройств от аварий, вызываемых прохождением токов выше положенной нормы, на линиях ставятся предохранители. Для малых сил тока применяются предохранители с ввинчивающимися в них пробками, в которых имеется плавкая проволочка, подобранная на определенную силу тока. При больших же силах тока применяются пластинчатые или собранные из ряда параллельно размещенных проволочек, по которым и разветвляется ток линии. В качестве плавкового материала обыкновенно применяется свинец или серебро. Последнее, конечно, дороже, но под действием сильного тока оно плавясь сгорает до конца, тогда как свинцовая проволочка, а особенно пластина плавясь дает во все стороны брызги, что, помимо загрязнения, может повести и к другим нежелательным последствиям.

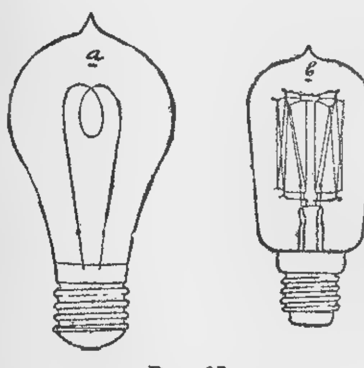


Рис. 97.

Тонкий проводник, при пропускании через него тока большой силы, может нагреться не только до заметного глазу накала, но может дать и свет. Первый, кто использовал этот накал в своих лампочках, был русский электротехник Лодыгин. Первым же, кто не только использовал такую возможность и при том независимо от Лодыгина, но создал такой тип лампы накаливания с ее ввинчивающимся цоколем, который оказался применимым на практике был всемирно известный американский изобретатель Эдисон (род. 1847 г.). Со времени изобретения *калильных ламп* Эдисоном, они имеют уже большую и сложную историю. Не касаясь ее укажем, что в настоящее время применяются на практике лампы с угольной нитью (рис. 97*a*), с нитью из вольфрама (рис. 97*b*) и других металлов, напр., осрама (сплав осмия и вольфрама). *Угольные лампы* у нас были стандартизированы на 40, 55, 90 и 115 ватт при напряжении в 100 — 130 вольт и 40, 65, 100 и 135 ватт при напряжении 200 — 260 вольт, при чем сила света составляет в первом случае 9, 13, 20 и 26 свечей, во втором случае 7, 13, 20 и 26 свечей (международных). Отсюда удельное потребление мощности получается от 4,3 до 5,3 ватта на свечу. Угольные лампы, в силу их невыгодности, применяются теперь лишь в лабораториях в нагрузочных реостатах, о которых уже упоминалось в § 6, и там, где часто наблюдается хищение ламп, как например, в общественных уборных, безлюдных коридорах и т. д., хотя и в этих случаях часто к угольным лампочкам уже не прибегают. *Металлические лампы*, так же как и угольные, дают свет от нити, накаливаемой в пустоте, но накал в них получается при более высокой температуре, почему и лампа расходует более 1 ватта на свечу, называясь на практике *одноватной*. Нити в этих лампах изготовляются из твердотянутого вольфрама и отличаются достаточной прочностью, почему теперь их применяют для блочных подвесов, настольных и переносных арматур, при станочных работах, вообще в таких местах, где раньше обыкновенно пользовались угольными лампами. Металлическая лампа дает более белый свет, более близкий к дневному, чем угольная, и экономнее расходует ток (приблизительно в 3,5 раза менее). Она выгоднее для абонентов электрических станций и вместе с тем последним дает возможность при такой же мощности своих машин обслуживать больший круг абонентов. Металлическая лампа, в силу своей выгодности, проложила путь электричеству в квартиры тех трудящихся, которым раньше электричество было совершенно недоступно. Теперь же оно везде вошло в общий обиход. Металлические так называемые «одноваттные» лампы у нас стандартизированы на 15, 25 и 50 ватт при напряжении 110 и 120 вольт и на 20, 30 и 50 ватт при напряжении в 220 вольт. При этом их средняя сила света составляет соответственно в первом случае 8,6 17,3 и 35,7 международной свечи, а во втором случае 11,1, 18,8 и 34,5 международной свечи.

Следовательно, удельное потребление в этих лампах составляет от 1,40 до 1,80 ватта на свечу.

Помимо угольных и вольфрамовых ламп у которых нить накаливается в пустоте и которые поэтому называются пустотными или вакуумными,[1] широко идут металлические газополные лампы, ошибочно называемые «полуваттными» и употребляемые обыкно-

[1] Правильные названия для вышеописанных ламп: угольная пустотная и металлическая или вольфрамовая пустотная (а не «одноваттная»).

венно для общего освещения как закрытых помещений, так и дворов, улиц, площадей и т. д. Металлическая нить накаливается в этой лампе уже не в пустоте, а в атмосфере азота (иногда с примесью аргона), почему температуру накала в лампе можно поднять еще выше без опасения, что нить будет сильно распыляться. Повышением точки накала, с применением газа, и особым размещением нити достигают того, что источник света концентрируется, приближаясь к типу светящейся точки (рис. 98), и расход энергии в нем уменьшается, все же не доходя до полуватта. Число свечей на цоколях этих ламп в настоящее время не отмечается. На них ставится то число ватт, которое должна потреблять лампа при определенном напряжении. Поэтому, имея лампу на 200 ватт, ни в коем случае нельзя говорить, что она дает около 400 свечей. В СССР стандартизированы газополные лампы на мощность 50 — 1000 ватт с потреблением на 1 сферическую свечу в ваттах от 0,68 для самых больших ламп до 1,6 — для самой малой лампы.

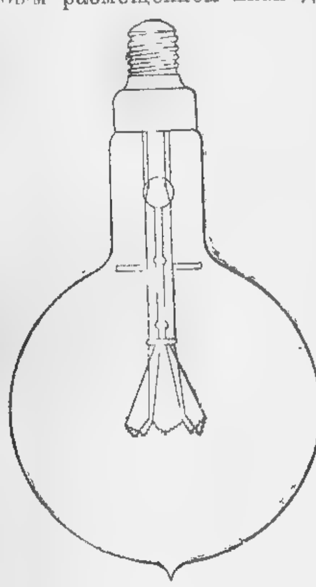


Рис. 98.

Дешевизна металлических газополных ламп, простота их обслуживания, а также и то обстоятельство, что они изготовляются для различных сил света, привели к тому, что другого типа источник тока, лампы с *вольтовой дугой*, почти повсеместно, особенно у нас, вытеснен металлической лампой. Вольтова дуга впервые была получена русским профессором физики Петровым (1802 г.), позднее его английский физик Деви получил эту дугу самостоятельно (1808 г.) и с его именем обыкновенно и связывают открытие вольтовой дуги. В современных *дуговых лампах* дуга получается между двумя углями специального изготовления. Для правильного горения дуги требуется определенное напряжение, например, для ламп с открытой вольтовой дугой — 40 — 50 вольт при постоянном токе и 28 — 30 вольт при переменном токе. О необходимости включения с лампами реостатов говорилось в § 16. Так как при сгорании углей расстояние между концами их, дающими дугу, увеличивается, необходим регулятор, особый механизм, который по мере надобности сближал бы сгорающие концы углей.

На рис. 99 мы видим последовательно с углями включена толстая обмотка I регулятора, а параллельно к цепи лампы присоединена тонкая обмотка II. Не касаясь подробностей, укажем, что, если угли сблизятся свыше нормы, обмотка I втянет железный стержень *1* и раздвинет угли; если расстояние между углями возрастет больше, чем нужно, сила тока в цепи катушки I уменьшится, а в цепи катушки II возрастет. Тогда она втянет железный стержень *2* и тем самым сблизит угли. В нормальных условиях обе катушки оказывают на подвижную систему равное и противоположное действие; при неправильном горении механизм действует за счет разницы втягивающих усилий обеих катушек. Поэтому описанная лампа называется дифференциальной. Систем регуляторов очень много, и все они являются слабым местом дуговой лампы. Кроме саморегулирующихся ламп, применяются лампы с ручным регулированием дуги. Регуляторы ручного действия находят применение в кинематографах, проекционных фонарях и т. п.

Рис. 99

Лампы с простыми углями расходуют при постоянном токе около 0,5 ватта на свечу и при переменном токе около 0,9 ватта на свечу. Лампы с углями, в которых есть примесь солей металлов (стронция, бария и т. д.), потребляют уже до 0,25 ватта на свечу и дают весьма эффектное освещение, почему до сих пор еще находят известное применение. Современная дороговизна углей и высокие эксплоатационные расходы (смена углей, регулирование механизма, чистка и присмотр за ним) по обслуживанию дуговых ламп выдвинули на первое место газополные лампы, мощность которых в специальных установках доходит до 50 киловатт.

Вольтова дуга получается также в *ртутных* и *кварцевых* лампах. Ртутная лампа представляет собою стеклянный сосуд с положительным железным или графитовым электродом и отрицательным — ртутным. При зажигании лампы ее встряхивают, чтобы через жидкую ртуть прошел ток. Тогда в лампе получаются ртутные пары, которые и дают свет, богатый фиолетовыми лучами, делающими эти лампы пригодными при фотографировании. В кварцевых лампах стеклянная трубка заменена более короткой из кварца (горного хрусталя). Кварц — тугоплавкий материал, почему в кварцевой лампе допускается более высокая температура и давление паров ртути. Кварцевые лампы дают до 3000 свечей и потребляют около 0,25 ватта на свечу. Область применения их общее освещение фабрично-заводских зданий, где оттенок света

не играет роли (не нужно разбираться в цветах окрашиваемых предметов), и в медицине, как источник ультрафиолетовых лучей, обладающих целебными свойствами, так называемое «горное солнце». Кроме того, кварцевые лампы употребляются для различного рода анализов.

Техника последних лет принесла много нового в области электрических источников света. В металлических лампах начинают применять нити, изготовленные из смеси вольфрама с окисью тория, что придает нитям гибкость и, следовательно, увеличивает их прочность. В новом типе кварцевой лампы достигли расхода на свечу 0,2 ватта при силе света 5000 свечей. Дальнейшим развитием безвоздушных ламп типа ртутных и кварцевых с разреженными газами и парами является новая лампа Нернста, дающая вольтову дугу между электродами, помещенными в парах хлористого или бромистого цинка. В неоновой дуговой лампе электроды взяты из смеси металлического таллия с кадмием, и вольтова дуга образуется в пространстве, наполненном смесью неона и гелия. Расход энергии в них 0,5 ватта на свечу, свет с красножелтым оттенком, не всегда пригодным для общего освещения. Другой тип ламп, также со смесью неона и гелия, использует разряд между большой поверхностью катода и железным анодом. Такие пятиваттные лампы дают около пяти свечей. Наконец, в вольфрамовой дуговой лампе, расходующей 0,65 — 0,42 ватта на свечу, дуга получается в стеклянном баллоне, наполненном инертным газом, как в полуваттной лампе; лампы эти строятся на 500 — 1000 свечей и дают весьма интенсивный свет белой окраски. Однако, из перечисленных ламп некоторое распространение получили лишь неоновые лампы (рекламные).

В технике искуственного освещения в настоящее время у нас происходит серьезный сдвиг, и вопросы освещения, в частности электрического освещения, приобретают исключительную важность. Считается уже не подлежащим сомнению, что дурное или недостаточное освещение уменьшает производительность труда, ухудшает качество изделий, затрудняет контроль над производством, служит препятствием в поддержании порядка и чистоты, вредит здоровью трудящихся и часто бывает причиной несчастных случаев. Хорошее освещение поэтому является одним из важнейших факторов в современном производстве, организованном в строгом порядке и развивающем высокую производительность. Правильное и хорошо устроенное освещение, как показывают специальные подсчеты, обходится при этом не дороже худого, и в конечном счете такое освещение всегда окупается. Отдельные предприятия и учреждения уже переходят у нас к рационализации освещения и, несомненно, в ближайшем будущем

запоздавшие в этом отношении предприятия принуждены будут также приступить к работе по переустройству освещения. На IX Всесоюзном электротехническом съезде, состоявшемся в 1928 г., приняты Правила искусственного освещения фабрик, заводов, мастерских и других рабочих и служебных помещений. Правила

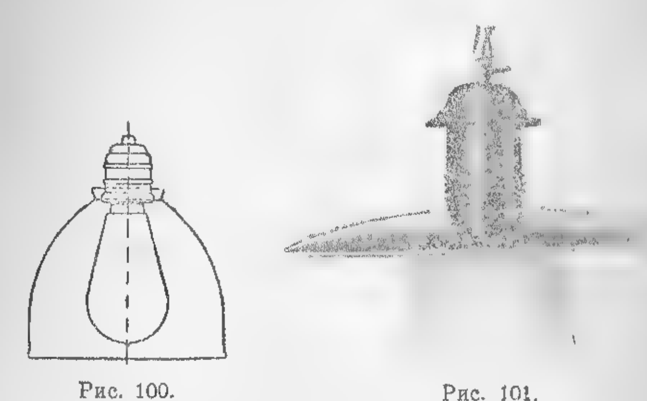


Рис. 100. Рис. 101.

эти[1] не только заключают нормы освещенности, но и дают ряд руководящих указаний.

Рациональное устройство освещения возможно лишь при наличии соответствующей арматуры. Всесоюзное Электротехниче

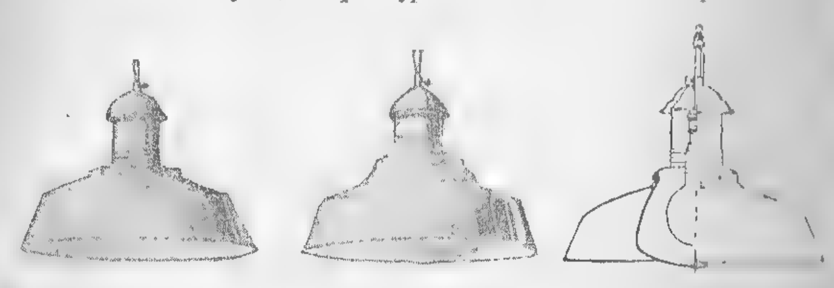


Рис. 102. Рис. 103. Рис. 104.

ское объединение (ВЭО) изготовляет следующие осветительные приборы для рационального освещения:

1. Осветительный прибор «Альфа», (рис. 100), представляющий собою алюминиевый или железный колпак для патронов

---

[1] См. «Электротехнические правила и нормы», издание ВЭО 1931 г.

местного освещения. Его применяют для освещения столов и отдельных рабочих мест, когда по условиям производства на данном рабочем месте требуется усилить освещение.

2. Осветительный прибор «Билюкс» (рис. 101) для общего освещения рабочих помещений, высота которых ниже 5 м.

3. Осветительный прибор «Универсаль» (рис. 102—104) для общего освещения рабочих помещений, высота которых выше 5 м.

4. Осветительный прибор «Люцетта» (рис. 105 и 106) для освещения библиотек, больниц, школ, контор, бюро, чертежных зал, аудиторий, магазинов, жилых помещений.

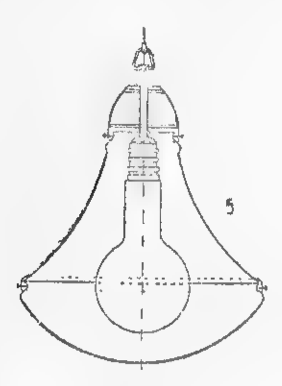


Рис. 105.

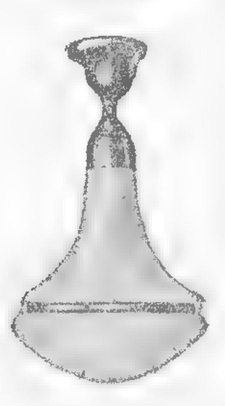


Рис. 106.

Приборы эти уже нашли широкое применение и дали очень хорошие результаты. В фабрично-заводских помещениях у нас особенно распространен осветительный прибор «Универсаль» с затенителем.

§ 59. Вопросы для повторения.

1. Что такое термоэлементы и на чем основано их действие?
2. Какова область применения термоэлементов?
3. Привести примеры тепловых действий тока?
4. Как устроены электрометаллургические печи?
5. Как производится электрическая сварка?
6. Как действуют предохранители?
7. Охарактеризовать угольную пустотную лампу?
8. Охарактеризовать металлическую пустотную лампу?
9. Охарактеризовать металлическую газополную лампу.
10. Как действует регулятор дифференциальной дуговой лампы?
11. Каков удельный расход мощности в дуговых лампах?

12. Какие особенности ртутных и кварцевых ламп?
13. Какое значение имеет хорошее освещение?
14. Какую арматуру для ламп изготовляет ВЭО?

§ 60. Применение на практике магнитов, электромагнитов и соленоидов (катушек без железного сердечника).

Магниты, электромагниты и катушки без железа находят самое разнообразное применение. Так, постоянные магниты применяются в магнито-электрических машинах (§ 44), в измерительных приборах постоянного тока (§ 63), в звонках, реле и других так называемых поляризованных приборах. *Поляризованный* звонок изображен на рис. 107. Мы видим у звонка два постоянных магнита с укрепленными на них двумя электромагнитами *Э*, сердечники которых на свободных концах имеют одинаковую полярность. При пропускании через обмотку электромагнитов переменного тока (обыкновенно от индуктора), концы их поочередно получают от этого тока то северную полярность, то южную. В первом случае мы имеем ослабление основного южного магнетизма, во втором — его усиление. Это усиление поочередно имеет место на концах сердечников обоих электромагнитов, и где оно в данный момент проявляется, к тому сердечнику и притянется соответствующий конец якоря *A*. От такого попеременного притягивания концов якоря к электромагнитам он получает колебательное движение, и связанный с ним молоточек *M* ударяет то по одной, то по другой звонковой чашке. Такой поляризованный звонок называется на практике звонком *индуктивным*, или *переменного* тока, так как действует от индуктора, дающего переменный ток. Еще более распространены электромагниты. Каждая электрическая машина представляет собою электромагнитный механизм. Телефоны и телеграфы широко пользуются работой электромагнитов.

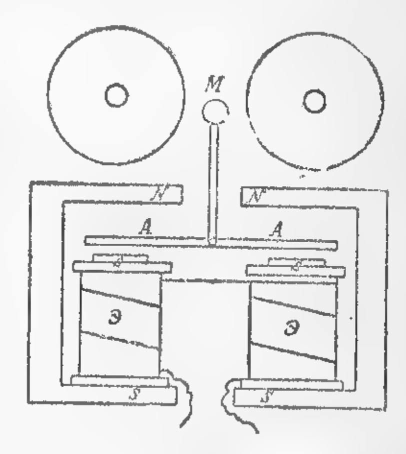


Рис. 107.

В схеме *a* рис. 108 представлено *электромагнитное реле P* в применении его к звонковой сигнализации. Кнопка *K*, мы видим, замкнута, и потому батарея *Б* все время дает ток в об-

мотку реле, вследствие чего якорь реле всегда притянут, и самостоятельная цепь звонка *З*, действующего от элемента *Э*, в месте *к* разомкнута. Как только мы нажмем кнопку *К* и тем разомкнем линию, ток в реле не пойдет, якорь от его сердечника отойдет, замкнет контакт *к*, и звонок придет в действие. Оттого, что по реле все время идет ток, оно называется реле на *постоянном токе* в противоположность реле на *рабочем токе*, в которое дается ток лишь тогда, когда приводится в действие звонок. Реле действует и от самых слабых токов и на практике имеет самое разновидное применение как в технике связи, так и в технике сильных токов. В данном случае, если бы место, где находится кнопка *К*, связали с звонком *З* непосредственно, без всякого реле, то при большом расстоянии, для правильного действия звонка, понадобилась бы более сильная батарея. Реле, таким образом, дает возможность значительно сэкономить на числе элементов. Непрерывное потребление тока линией реле находит свое оправдание в том, что линия эта находится как бы под контролем, и, в случае обрыва в ней провода, звонок сейчас же придет в действие. Такая сигнализация незаменима, как предохранение от воров и грабителей.

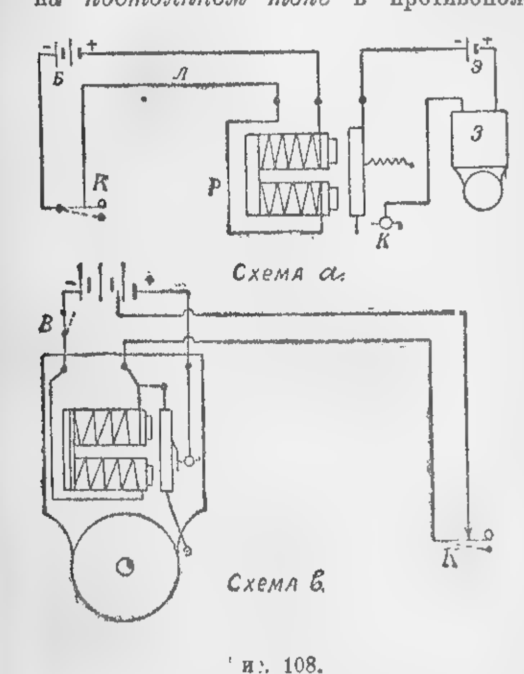


Рис. 108.

Если бы они, желая обезопасить себя от тревожных звонков, вздумали перерезать провода хотя бы в точке *Л*, сигнализация тотчас же заработала бы и дала бы предупредительный сигнал. Такую схему «на постоянном токе», можно выполнить и при помощи обыкновенного звонка, если только у него устроить дополнительный средний контакт. Его крайние зажимы, согласно схеме в рис. 108, присоединены непосредственно к батарее, и звонок действовал бы непрерывно, если бы от части батареи не был подведен

ток к среднему зажиму через контакт *К*. Под действием этого тока якорь все время притянут к электромагниту, и звонка нет. Если же нажать на кнопку контакта *К* и тем самым прервать ток в линии, или если оборвать провода в линии, средний контакт в действии уже не будет, и звонок подаст тревожный сигнал, получая ток от всей батареи. Выключателем *В* можно выключить звонок и прекратить звон, чтобы тем самым сэкономить расход батареи. Последнюю для такой сигнализации необходимо иметь из элементов Мейдингера или Даниэля (применяется также батарея аккумуляторов), пригодных для работы на так называемом постоянном токе.

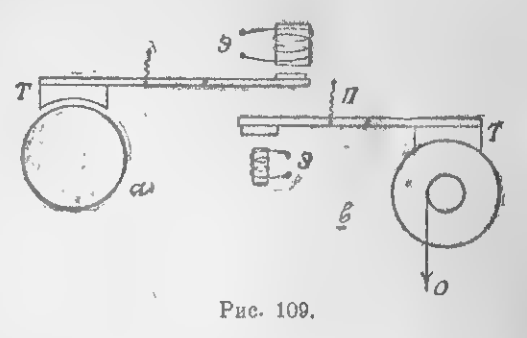


Рис. 109.

Широко применяются для торможения электромагниты. На рис. 109 представлен тормоз с тормозной колодкой *Т*, прижимаемой к колесу при подаче тока в электромагнит *Э*. Такая система применяется для торможения подвижного состава. В грузоподъемных механизмах пользуются электромагнитом для *растормаживания*. На рис. 109 тормоз *Т* все время притянут к ободу колеса. Как только нужно привести механизм в действие, дают ток в соответствующий мотор и одновременно — в катушку тормозного электромагнита, который и преодолевает затормаживающее действие упругой пружины *П*.

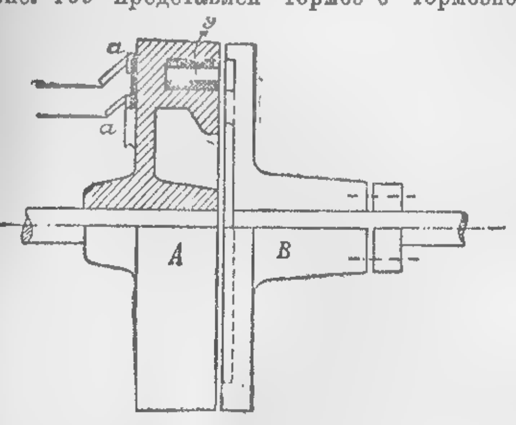


Рис. 110.

Весьма интересны сцепные электромагнитные муфты, более дорогие и потому не нашедшие широкого потребления. В электромагнитной муфте рис. 110 ведущая половина муфты *А* закреплена на валу наглухо. Постоянный ток при помощи двух щеток

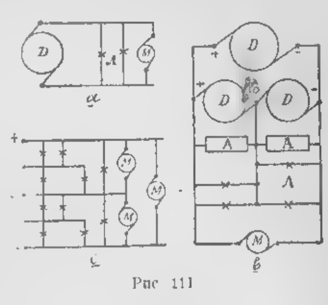
а подводится к контактным кольцам *b* и оттуда к катушкам электромагнитов *Э*, из которых одна пришлась на разрез рисунка. Вторая половина муфты *B*, ведомая, имеет кольцо из ненамагничивающегося материала, приходящееся против электромагнитов. Если вал с муфтой *A* вращается и в катушки *Э* дан ток, муфта *A* увлечет за собою муфту *B* и, следовательно, вал, на который она насажена (сравнить с диском Араго в § 48). Расцепление половин муфты *A* и *B* производится простым выключением тока, что дает возможность управлять передачей с различных мест, и при том с пунктов, удаленных от передачи, не подходя к последней.

Катушки без железных сердечников также во многих случаях находят применение. Они использованы в так называемых электромагнитных амперметрах и вольтметрах (§ 63), в амперметрах и вольтметрах с постоянными магнитами (§ 63), в ваттметрах (§ 63), в регуляторах для дуговых ламп (§ 58), для управления семафорным крылом на железных дорогах и т. д.

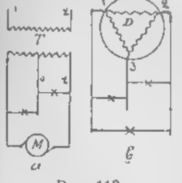
§ 61. Канализация электрической энергии.

Для подачи энергии на далекое расстояние служат так называемые линии электропередачи. За редким исключением все они переменного тока. Распределение электрической энергии, вырабатываемой электрич. станцией, носит название канализации так как электр. ток идет по проводам подобно тому, как вода идет по каналам. Для наших электропередач IX Всесоюзным Электротехническим съездом установлены в качестве предпочтительных следующие напряжения: 6000 — 6600 вольт, 30 — 33, 60 — 66 и 100 — 200 киловольт. Величина напряжения находится в зависимости от передаваемой мощности и длины линии. В местах потребления сети принимают сложный вид. Распределительные сети распределяют электрическую энергию по местам потребления непосредственно — по фабрикам, заводам, жилым домам, общественным учреждениям и пр. потребителям. Замыкаясь в местах скрещивания, части сети образуют узлы. К некоторым из этих узлов и к другим пунктам распределительной сети подходят провода от питательной сети. Эти места питания сети распределительной от сети питательной называются питательными пунктами. Питательная сеть может быть простой и состоять из отдельных питательных линий (фидеров), идущих к питательным пунктам от станции или подстанции, может быть и более сложной, сама питаясь от станции или подстанции. Если питательная сеть по своему напряжению отличается от распределительной, то в питательных пунктах необходимо установить трансформаторы. Расчет сетей производится по сложным формулам, часто в нескольких вариантах на основании различных исходных предположений — для выполнения работы по напвыгоднейшему из них.

Для постоянного тока применяются *двух-, трех- и пятипроводная системы* канализации тока. На рис. 111 схема *a* показывает присоединение приемников, ламп *Л* и электродвигателя *M* в двухпроводную сеть, схема *b* — в трехпроводную сеть и схема *c* — в пятипроводную сеть. При трехпроводной системе динамомашины соединяются согласно схеме *b*, где, кроме машин *D* показаны и аккумуляторные батареи *A*. На небольших установках применяются машины, дающие непосредственно от себя нулевую точку. Из таких машин наибольшее распространение получила машина с *делителем напряжения* Доливо-Добровольского.


Рис 111

В однофазном токе применяется двух- и трехпроводные системы распределения тока. Двухпроводная система подобна такой же системе постоянного тока. Трехпроводная система получается от трансформатора *T* (схема *a* рис. 112). В трехфазном токе фазные обмотки машин и трансформаторов соединяются звездой или треугольником, при чем общий фазный узел в звезде может служить для присоединения нулевого провода. Электродвигатели присоединяются к трехфазным проводам, лампы накаливания при трехпроводной системе — к любой паре проводов, при четырехпроводной системе — к одному из фазных и к нулевому проводу. Присоединение ламп в обоих этих случаях показано на схемах рис. 112*b* и 113.


Рис. 112.

Ко всякой электрической установке предъявляется требование *технической правильности, экономичности, безопасности для жизни и имущества граждан.* Мы знаем уже, что электрические провода рассчитываются так, чтобы они сильно не

нагревались, чтобы падение напряжения (или потеря мощности) составляло в них не более определенного процента. Провода прокладываются так, чтобы всякого рода контакты в линиях не имели большого сопротивления, чтобы линии были хорошо заизолированы от столбов, стен, корпуса машины и т. д., так как иначе получится заземление, утечка тока, и могут произойти аварии. На рис. 114 мы имеем: случаи заземления (E) одного провода, двух проводов и короткого замыкания линии посторонним предметом, трубой T. Если один провод заземлен, и человек, стоя на мокрой земле или держась за хорошо заземленный предмет, например, металлическую мачту, водопроводную трубу, коснется оголенной части другого проводника, хотя бы в точке A, через него пойдет ток, о действии которого на человека будет сказано в § 62. При двух заземленных проводах, от одного провода в другой идет через землю ток. При малом токе происходит его невыгодная утечка. При большом токе сгорят линейные предохранители. Подобные последствия будут иметь место и при замыкании двух проводов посторонним предметом. При хорошем контакте трубы T с проводом, сгорят предохранители. Такой эффект замыкания цепи посторонним предметом или поврежденной частью установки, например, поломанным патроном, поврежденной обмоткой двигателя или динамо, называется *коротким замыканием*, о котором уже говорилось в § 9.

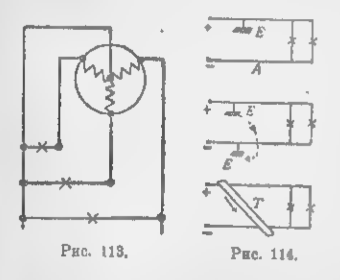


Рис. 113. Рис. 114.

Для того, чтобы электрические установки функционировали правильно, они должны удовлетворять *правилам безопасности и правилам и нормам для электротехнических устройств*, каковые приняты и периодически, применительно к требованиям жизни и состоянию техники, перерабатываются и дополняются на всесоюзных электротехнических съездах

§ 62. Физиологические действия тока.

Свет, звук, теплоту и многие другие явления природы мы можем воспринимать непосредственно, потому что самой природой наделены необходимыми для этого органами чувств. Для

непосредственного же ощущения электричества мы не имеем соответствующего органа. Поэтому мы не замечаем его в природе и знакомы с ним лишь по его проявлениям, связанным с его ценным свойством превращаться в свет, в звук, в теплоту, в движение и т. д. Мы не замечаем электричества в природе, но когда с электрической силой нам приходится сталкиваться непосредственно, физиологически нашими органами чувств, мы его ощущаем (теплота, свет).

При прохождении тока через человеческое тело, главнейшее значение имеет его сила, при чем опаснее всего прохождение тока через легкие и менее опасно прохождение через конечности. Как при прохождении тока через тело человека, так и от мгновенного электрического разряда, может произойти обморочное состояние (мнимая смерть), из которого человека можно вывести, прибегнув к искусственному дыханию. Если время будет пропущено, мнимая смерть переходит незаметным образом в настоящую смерть. Сила тока, идущая в тело человека, зависит от качества контакта (прикосновения): мокрая рука хуже, чем сухая, грубая, мозолистая кожа лучше нежной. Большое значение имеет плотность тока, т. е. сила тока, приходящаяся на единицу поверхности контакта, продолжительность протекания тока, его полярность, а при переменном токе — его частота (число периодов в секунду). Прикосновение к катоду причиняет организму больше повреждения, чем прикосновение к аноду. Переменный ток действует значительно сильнее, чем постоянный ток. Если слегка прикоснуться двумя пальцами одной руки к обоим проводам переменного тока напряжением 110 вольт, то ощущаются легкие периодические уколы как бы булавкой. Если мы, не меняя условий прохода через человека переменного тока, будем менять лишь частоту, то максимальное болезненное воздействие, как показывают опыты д'Арсонваля, получим при 2500 периодах в секунду. Далее болезненное физиологическое воздействие уменьшается и при 10 000 периодах сводится к нулю. Такие токи, токи большой частоты, при силе в 2-3 ампера вызывают лишь легкое ощущение тепла в местах контактов с электродами, увеличивают деятельность обмена веществ в человеческом организме и потому применяются в медицине. А между тем токи тех частот, которые применяются в технической практике, опасны для человека даже и в том случае, когда они достигают величины от 50 до 150 миллиампер. Вот почему считают опасным для жизни постоянный ток уже при напряжении от 500 вольт и выше и переменный ток от 220 вольт. Конечно, точных граней установить невозможно так как в каждом частном случае большую роль играет индивидуальность лица, соприкасающегося с электриче-

ством. Статистика за последнее десятилетие отметила несколько случаев смерти от постоянного тока 110 вольт. А с другой стороны, при счастливых обстоятельствах, и более высокие напряжения переменного тока не оказывают вредного действия. Во всяком случае, как общее правило, можно установить, что лица с расстроенной нервной системой, алкоголики принимают удар током более болезненно. Для людей, имеющих представление об электричестве, как о жизнеопасном виде энергии, или для лиц, знающих, что им предстоит удар током, и подготовленных к нему, такой удар реже сопровождается смертельным исходом. Электрический удар часто бывает лишь косвенной причиной несчастных случаев. Так, если монтер, попав под ток при работе на лестнице, падает с нее и получает увечье при падении, удар током будет лишь косвенной причиной увечья.

Весьма неприятны ожоги, которые получает человек от образования вольтовой дуги между ним и электрическим проводом. Процесс заживания в этом случае протекает гораздо болезненнее, чем при обыкновенном ожоге.

§ 63. Измерительные приборы.

Для измерения силы тока служат *амперметры*. На рис. 115a показан амперметр, работа которого основана на

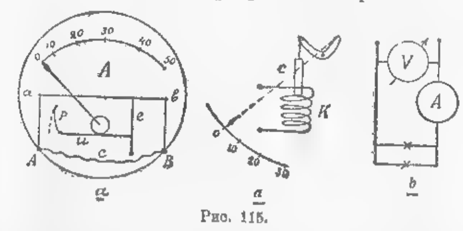


Рис. 115.

тепловом действии тока. Включенный, согласно схеме рис. 115c, своими зажимами A и B амперметр пропускает полный ток цепи по двум параллельным ветвям — через тонкую платиноиридиевую проволоку ab и по *шунту* c. Шунт (параллельное ответвление) здесь необходим потому, что только тонкая проволока пригодна для измерительных целей, а при пропускании сильных токов она неминуемо сгорела бы. Шунт так подсчитан, что по нему идет вполне определенная доля линейного

тока, почему на шкале прибора можно сделать отметки всего тока, входящего в амперметр. Проходя по проволоке ab, ток ее нагревает, отчего она удлиняется и ослабляет проволочку e. Тогда нить u, перекинутая через колесико со стрелкой прибора и все время натягиваемая пружиной p, будет ослаблена, получит сдвиг в сторону пружины и вместе с тем повернет колесико со стрелкой, которая и даст показание. Если такой прибор изготовить без шунта и последовательно с проволокой ab включить сопротивление (монтируется в основании прибора), прибор можно включить в качестве *вольтметра* (рис. 115c). По закону Ома, ток в приборе будет тем сильнее, чем выше напряжение в цепи, почему в этом случае на шкале можно нанести уже не амперы, а вольты. *Тепловые* приборы пригодны как для постоянного, так и для переменного тока, так же, как и *электромагнитные* амперметры и вольтметры, принцип действия которых показан на рис. 115b. У таких приборов имеется катушка, в которую втягивается при прохождении тока по катушке, например, тонкий железный стерженек c, связанный с системой рычагов, служащих для вращения стрелки, которая и показывает на шкале искомую величину. Катушка K в амперметре делается из малого количества витков проволоки, достаточной для данной силы тока толщины, так, чтобы втягивающее усилие, зависящее от произведения числа ампер на число витков, было достаточным. В вольтметре, наоборот, катушка имеет много витков тонкой проволоки, и потому по нему проходит слабый ток, но произведение ампервитков получается достаточным для действия прибора. Электромагнитные приборы пригодны для постоянного и переменного токов, проще других по конструкции, дешевле, более выносливы и наиболее распространены.

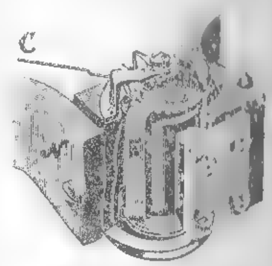


Рис. 116.

На рис. 116 частично изображен измерительный прибор с постоянным магнитом, пригодный лишь для постоянного тока. В магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом находится подвижная катушка K, к оси которой, с обеих сторон этой оси, при помощи специальных спиральных пружинок, подводится ток. На этой же оси укреплена и стрелка, показывающая амперы или вольты. Для большей легкости и подвижности катушки она имеет

небольшое число витков тонкой проволоки. Поэтому, когда такой прибор служит для измерения силы тока, катушка снабжается шунтом; если же прибор предназначается для измерения напряжений, последовательно с катушкой включается значительное сопротивление, монтируемое в самом приборе. Приборы с постоянными магнитами («Вестоновского типа») принадлежат к числу точных, но дорогих измерительных приборов.

На рис. 117 показан *электродинамический ваттметр*, включенный на кипятильник K, и рядом дана упрощенная схема его включения в цепь с лампами накаливания. Неподвижная толстая обмотка ваттметра A включается последовательно с приемником, благодаря чему по ней протекает весь ток, как по амперметру, при чем и здесь при больших токах необходимо применение шунта. Вращающаяся шунтовая обмотка B включена параллельно с приемниками, подобно вольтметру. При включении ваттметра в электрическую сеть, по его обмоткам идут токи, вызывающие магнитные потоки. Крутящий момент, возникающий вследствие взаимодействия этих потоков, будет поворачивать рамку B и вместе с нею стрелку, отклонения которой и укажут нам на шкале прибора число ватт, потребляемых приемниками. Такой прибор равно пригоден для измерения мощности в постоянном и однофазном токе. Измерения мощностей в трехфазных цепях несколько сложнее.

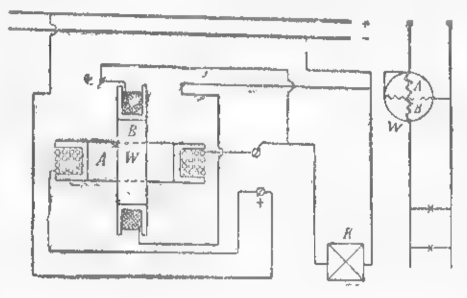


Рис. 117

Если тонкую обмотку ваттметра выполнить как якорь машины постоянного тока, внести в прибор ряд конструктивных изменений, прибор будет регистрировать (отмечать) потребляемую в цепи

энергию, и мы получим простейшей конструкции *счетчик*, пригодный как для постоянного, так и для однофазного тока. Впрочем, в однофазном токе, как и в трехфазном, обыкновенно применяются специальной конструкции индукционные счетчики, в которых использованы «паразитные» токи Фуко, выполняющие в данном случае уже полезную работу.

Основные конструктивные части счетчика электродинамического типа, обычно применяемого в двух проводных цепях постоянного типа, показаны на рис. 118. Подобно ваттметру (рис. 117) счетчик имеет две обмотки, — неподвижную обмотку A, включаемую последовательно с приемниками, как амперметр (рис. 115*c*), и подвижную обмотку B (рис. 118 и 119), вращающуюся и включаемую параллельно к той части цепи, для которой определяется прибором

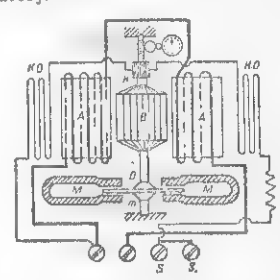


Рис 118.

потребление энергии. По обмотке A идет полный ток исследуемой цепи (или ему пропорциональный, если обмотка эта шунтирована). По обмотке якоря B, снабженного коллектором K, идет

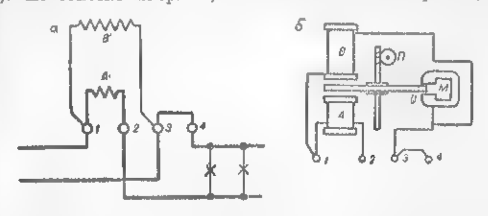


Рис 119

ток больший или меньший — в зависимости от напряжения сети. Вращение якоря в таком случае будет пропорционально силе тока I и напряжению E, другими словами, пропорционально числу ватт, потребляемых в цепи. В цепь подвижной катушки B, расположенной на вращающемся якоре, включено добавочное сопротивление C для того, чтобы сила тока в якоре была

минимальной и он был по возможности легким. Рядом с обмоткою A помещена компенсационная обмотка KO, назначение которой давать дополнительный к потоку обмотки A поток, дающий вспомогательное вращающееся усилие на преодоление трения, вследствие чего якорь может притти во вращение при самом слабом токе. На вертикальном валу якоря имеется червяк, зацепляющий за колесо счетчика оборотов. Алюминиевый диск $Д$ с постоянными магнитами M служит для торможения. При вращении диска между полюсами магнита в нем возникают токи Фуко, тормозящие движение. Схема включения счетчика показана на рис. 119*а*. Эта схема будет правильна и для включения *индукционного* счетчика однофазного тока (рис. 119*б*), у которого вращающаяся часть состоит из алюминиевого диска $Д$ и передаточного механизма $П$ к циферблату, показывающему гектоватт часы или киловатт-часы. Обмотки А и B возбуждают в диске своими меняющимися по величине и направлению магнитными потоками токи Фуко. В результате взаимодействия этих токов и магнитных потоков обмоток А и B диск приходит во вращение. Индукционный счетчик, как и электродинамический является счетчиком *моторного* типа.

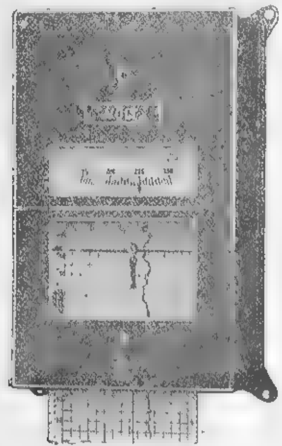


Рис. 120.

Наряду с перечисленными приборами на электрических станциях устанавливаются *измерители частоты (периодометры)*, *фазометры* ($\cos\varphi$), *омметры* (приборы для контроля изоляции сетей). В качестве контрольных приборов, дающих вместе с тем возможность точнее производить учет работы станций, на таковых применяются *регистрирующие* или *пишущие* амперметры, вольтметры, ваттметры, и тогда кривые рис. 93 могут быть взяты прямо с записи прибора, а не путем построения на основании записи в журнальных книгах. Стрелки таких приборов имеют дополнительное приспособление в виде пишущего пера, которое и делает запись на листе бумаги, движущемся с определенной скоростью, соответствующей его разграфке, при помощи специального заводного механизма. Внешний вид регистрирующего вольтметра показан на рис. 120.

§ 64. Задачи

1. Тепловой вольтметр, включенный в сеть напряжением 110 V, имеет сопротивление в 770 омов. Определить силу тока, идущего по прибору.

Согласно закону Ома:

$$I = 110 : 770 = 0{,}143\ \text{A}.$$

2. Определить мощность, расходуемую прибором задачи 1.

По формуле (26):

$$P = E \cdot I = 110 \cdot 0{,}143 = 15{,}73\ \text{W}$$

это примерно мощность металлической лампы накаливания, ранее считавшейся 16-свечной.

3. Амперметр имеет шкалу на 5 ампер. Его внутреннее сопротивление составляет 0,02 ома. Определить падение напряжения в приборе и расходуемую в нем мощность.

Падение напряжения, по закону Ома:

$$e = I \cdot R = 5 \cdot 0{,}02 = 0{,}1\ \text{V}.$$

Расходуемая мощность:

$$P = 0{,}1 \cdot 5 = 0{,}5\ \text{W}.$$

4. Электромагнитный вольтметр имеет сопротивление 2000 ом.

Определить расходуемую им мощность при рабочем напряжении сети 120 вольт.

По формуле (26):

$$P = \frac{120^2}{2000} = 7{,}2\ \text{W}.$$

Сопоставляя данные задач 2 и 4, мы можем увидеть, что большое сопротивление вольтметра является выгодным, так как в этом случае расход мощности на прибор уменьшается.

§ 65. Особенности переменных токов.

По сравнению с постоянными токами, переменные токи производят несколько иные действия: химические, физиологические, световые и электромагнитные.

Так как для зарядки аккумуляторов требуется ток постоянного направления, то переменным током заряжать аккумулятор нельзя. Мало того, за один полупериод в цепи даже получится короткое замыкание, отчего аккумуляторы попортятся и сгорят предохранители. Равным образом, все химические действия, описанные в § 53, могут иметь место лишь при постоянном токе. Для распознавания полюсов в постоянном токе пользуются полюсной

[illegible]уманой бумаги, пропитанная раствором фенолфталеина, [illegible] от образующейся щелочи, бумага, пропитанная раствором [illegible], дает синюю окраску от [illegible] у полюса. Каждый из проводов переменного тока может [illegible] любую из этих окрасок. Явление несколько изменится, если мы оба провода быстро проведем на полосной бумаге, смоченной водой. Красные или синие черточки ([illegible] бумага дает красную окраску) получатся с перерывами, что легко объяснимо. Вода переменным током не разлагается на водород и кислород, а лишь нагревается, каковым обстоятельством можно пользоваться для устройства кипятильников.

О физиологических действиях переменного тока говорилось в § 62, о тепловых и световых действиях — в § 58. Влияние числа периодов переменного тока отмечено в § 34. Здесь надлежит лишь указать, что в постоянном токе угли дуговой лампы обыкновенно располагают по одной вертикали, и, если свет не отражается рефлектором кверху, положительный уголь берется верхним, так как около 85% всего света дается именно им, и при таком положении угля этот свет отбрасывается книзу. При переменном токе оба угля дают одинаковое количество света, почему, для лучшего использования света вольтовой дуги, в этом случае необходимо над верхним углем помещать рефлектор, или же оба угля помещать наклонно, так чтобы вместе с дугой, образующейся внизу углей, они составили римскую цифру V.

Приборы, действие которых основано на взаимодействии между полем постоянного магнита и катушки с током, как амперметр Вестона, описанный в § 63, для переменного тока непригодны. Приборы с электромагнитами и катушками без железа пригодны как для постоянных, так и для переменных токов. Разница состоит только в том, что в сердечниках электромагнитов, питаемых переменным током, будут возникать, под влиянием переменного магнитного потока, токи Фуко, почему эти сердечники устраивают или из листового железа, как это было указано относительно трансформаторов (§ 51), или из пучка проволок, изолированных друг от друга. Токи Фуко появляются также и в проводах, в которых идет переменный ток, особенно, если эти провода железные или очень большого сечения. При этом в части, ближайшей к поверхности проводника, токи Фуко имеют направление главного тока и усиливают его, в части же, прилегающей к оси проводника, токи Фуко имеют направление, обратное линейному току, и потому ослабляют его. Это явление, сводящееся к распределению переменного тока по преимуществу ближе к поверхности проводника, носит название **скинэффекта**. При переменном токе,

следовательно, средний слой проводов большого сечения не работает, и потому такой провод берут иногда трубчатым.

Еще в 1890 году Э. Томсон произвел следующие интересные опыты с электромагнитами. Он брал электромагнит с толстой обмоткой на силу тока примерно в 25 ампер и ставил его так, чтобы ось сердечника была вертикальной. Сверху надевал на электромагнит металлическое кольцо несколько большего диаметра, чем сам электромагнит, и давал в обмотку электромагнита ток. Переменным магнитным потоком электромагнита в кольце возбуждались токи (как во вторичной обмотке трансформатора), и кольцо получало движение: под действием магнитного потока на кольцо с током кольцо отбрасывалось вверх. Если сердечник электромагнита над собою имел достаточной длины направляющую ось, то кольцо оставалось висеть в воздухе. Это отбрасывание кольца электромагнитом было впоследствии использовано некоторыми заводами для регуляторов дуговых ламп переменного тока. Вместо кольца можно взять кольцеобразную, закрытую сверху, коробку, продолжив сердечник электромагнита так, чтобы он слегка выступал над коробкой. При прохождении тока через электромагнит вода в этой коробке нагреется, и мы можем даже наблюдать парообразование. Во втором своем опыте Э. Томсон помещал над электромагнитом вместо кольца диск с вертикальной осью и частично прикрывал этот диск от электромагнита с его сердечником металлической пластинкой. Тогда токи Фуко возникали в этой пластинке и лишь в той части диска, которая не отгорожена пластинкой, служащей по отношению к диску электромагнитным экраном. При этом в диске возникали токи такого же направления, что и на ближайших участках экрана, и их взаимодействие вызывало появление вращающего момента, приложенного к диску. Впоследствии это динамическое действие токов Фуко было использовано Всеобщей компанией электричества для изготовления индукционных измерительных приборов, амперметров и вольтметров.

§ 66. Условные обозначения для электрических схем.

В § 24 мы ознакомились с международными обозначениями, принятыми для электрических величин и единиц Международной электротехнической комиссией еще в 1915 году. Приблизительно тогда же была осознана необходимость и в международном соглашении относительно электрических схем. Это соглашение несомненно было бы достигнуто, если бы не последующая мировая война. В настоящее время условные обозначения для электрических схем различных стран и в одной стране у различных

авторов сильно разнятся, что, конечно, имеет свои неудобства. На Всероссийских электротехнических съездах в свое время были лишь приняты условные обозначения для схем электрических сетей и линий, приводимые на рис. 121, где показаны:

1) — дуговая лампа с указанием силы тока в амперах;

2) — стенной патрон, штепсельная розетка с обозначением силы тока в амперах;

3) — неподвижная и подвижная лампы накаливания;

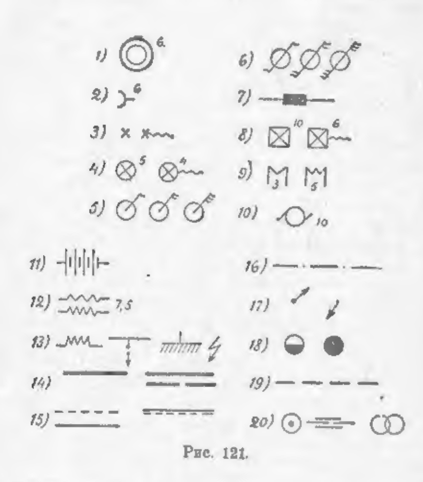


Рис. 121.

4) — неподвижная и подвижная арматуры с показанием числа ламп;

5) — одно-, двух- и трехполюсные выключатели с обозначением наибольшей допустимой силы тока в амперах;

6) — тоже, без переключателей;

7) — предохранитель в месте ответвления;

8) — неподвижный и переносный реостат, нагревательный прибор и т. п. с обозначением наибольшей допустимой силы тока в амперах;

9) — счетчики для двухпроводной, трехпроводной или трехфазной систем с обозначением киловатт;

10) — динамомашина или электродвигатель всех систем тока с обозначением наибольшей допустимой нагрузки в ватт;

11) — аккумуляторы;

12) — трансформатор с обозначением мощности в ватт;

13) — реактивная катушка, громоотвод, [illegible] молнии;

14) — распределительные доски для двухпроводной и для трехпроводной системы или для многофазного тока;

15) — проводы: одиночный, прямой и обратный, с проводами трехпроводной или трехфазной системы;

16) — неподвижно проложенные сложные провода всякого рода;

17) — вверх и вниз идущие провода;

18) — деревянный и железный столбы;

19) — трамвайный рабочий провод;

20) — питательный пункт, участковый изолятор, натяжной изолятор.

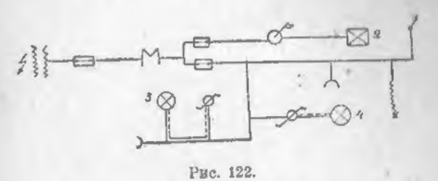


Рис. 122.

Какой вид может принять схема, например, квартирной проводки при пользовании приведенными условными обозначениями, можно видеть на рис. 122, на которой, для упрощения, контуры квартиры опущены.

§ 67. Электрификация СССР.

Электротехника — сравнительно молодая область техники. Крупным двигателем культуры электричество стало лишь с девяностых годов прошлого столетия. С электричеством, как новой силой, готовой служить ему, человечество познакомилось в 1873 г. на Венской выставке, в 1876 г. — на Лондонской выставке и в 1881 г. — на Парижской выставке, где демонстрировались динамомашина Грамма (кольцевая), электрическая свеча Яблочкова, ставшая уже теперь достоянием истории, лампы накаливания Лодыгина и Эдисона. Лодыгин в 1873 — 74 году создал

свою лампу накаливания. Усовершенствованная одним из его сотрудников Дидрихсоном она в 1875 году освещала один из магазинов в Петербурге и подводные работы при сооружении Литейного моста (ныне) через Неву. Работая над лампами накаливания, Эдисон уже в 1879 году произвел установку 115 штук лампочек на пароходе Колумбия, а Парижская выставка в 1881 г. окончательно решила судьбу электрических ламп. Первый город в Европе, устроивший уличное электрическое освещение (в 1885 году), был Хернозанд в Швеции. Динамомашина и лампа накаливания проложили широкую дорогу электричеству. Каких-нибудь 45 — 35 лет тому назад молодая электротехническая промышленность имела своей задачей обслуживать нужды лишь небольших осветительных электрических станций и городских железных дорог. Вслед затем на фабриках и заводах и у городских кустарей начал свою работу электродвигатель. Применение электричества в домашнем быту и сельском хозяйстве занимало тогда еще скромное место. Год от году расширялась область применения электричества, усовершенствовались способы выработки, передачи и потребления электрической энергии. На ряду с мелкими электрическими станциями в Европе и Америке, мы имеем теперь мощные электрические централи. На ряду с городскими трамваями мы имеем электрические железные дороги протяжением на сотни километров. Область применения электричества разрослась. С его главнейшими приложениями мы знакомы уже из настоящей книги, которая, однако, далеко не все эти приложения исчерпала. Мы знаем, что электричество работает в мастерских, работает на полях, электричество светит, греет, перевозит, поднимает тяжести и передает их с одного места на другое; электричество передает человеческую мысль (телеграф) и живое слово (телефон) человека на далекое расстояние, не считаясь в настоящее время благодаря радио ни с какими преградами, как высокие горы и океан. Уже в 1922 г. имели переговор две радиостанции, находящиеся на расстоянии 12 000 км, т. е. говорили между собою радисты-антиподы. Электричество занимает уже почетное место в электрометаллургии и химической промышленности. Электричество оказывает громадные услуги транспорту, давая двигатели для тяги и для приводов, освещая пути и здания, поддерживая связь между станциями, служа для целей сигнализации и блокировки, обслуживая централизованные стрелки и сигналы.

По сравнению с другими формами энергии, электричество имеет ряд существенных преимуществ. Оно дает возможность использовать такие источники энергии, которые остались бы неиспользованными или использовались бы в незначительном коли-

честве. Так сила больших водопадов оставалась бы неиспользованной навсегда, если бы падение воды (белый уголь) человечество не использовало для электрических станций. Также и бурый уголь и торф (серый уголь) не имеет смысла, в виду низкой их теплотворной способности, перевозить на далекие расстояния к потребителям, загружая транспорт. Гораздо выгоднее на местах добычи этих родов топлива строить мощные электрические станции и к потребителям подавать не сырую энергию топлива, а по линиям передач — электрическую энергию. Электрификация таким образом есть один из способов транспорта тепловой энергии. Такой способ транспорта целесообразен и в местах лесных разработок (зеленый уголь) и дальнейшей обработки древесины, откуда водным и железнодорожным транспортом могут направляться во все концы страны и за границу лишь ценные лесные материалы, а отбросы производства должны сжигаться на месте на крупных лесопильных силовых централях. Расходы топлива и электрической энергии будут минимальными, когда страна имеет такие электрические станции и когда она покрыта сетью электропередач и когда электротехника и теплотехника в тесном сотрудничестве и точной согласованности будут работать рука об руку, стремясь сократить до минимума важнейшие статьи расходов бюджета страны. Важным преимуществом электричества является возможность его крупной централизованной выработки, последующей передачи на далекое расстояние и дробимости для наиболее рационального использования на местах в самых разнообразных целях.

Особенную важность приобретает вопрос электрификации у нас в стране советов, где она является одним из важнейших орудий социалистического строительства.

В октябре 1921 года 8-й Всероссийский электротехнический съезд одобрил Ленинский план электрификации нашей страны, разработанный Государственной Комиссией по *электрификации* РСФСР (Гоэлро). Согласно этому плану, страна должна быть покрыта сетью электрических станций, по группам, связанным между собою линиями электропередач. В первую очередь намечено сооружение 27 основных районных электрических станций и электрификация некоторых железнодорожных магистралей. В части строительства станций программа эта выполнена почти целиком. Имена работающих уже крупных электростанций — Волховская, Шатура, Кашира, Штеровка, Земо-Авчальская и др. — известны каждому читающему гражданину. Электрификация железных дорог осуществляется в плоскости перевода пригородных участков с весьма интенсивным движением на электрическую тягу. Так уже съэлектрифицированы линии

Баку-Сабунчи и Москва-Пушкино. На очереди — Минераловодская ветка Северо-Кавказских железных дорог, Сурамский перевал, пригородные линии дорог Московского и Ленинградского узлов Октябрьских железных дорог и другие участки железных дорог. Согласно решения пленума ВКП(б) 15 июня 1931 г. ведущим звеном реконструкции нашего ж.-д. транспорта в перспективе его развития должна быть электрификация.

По данным эксплоатации электрических станций общего пользования СССР в 1928 — 1929 операционном году у нас насчитывалось к концу 1929 года 626 станций общего пользования, которые распределяются следующим образом:

	Число станций				
	Районных	Местных	Электрич. кольца	Теплоцентралей	Всего
РСФСР	21	360	—	3	384
БССР	—	23	—	—	23
ЗСФСР	3	58	—	—	61
УССР	2	101	28	—	131
Туркменистан	—	5	—	—	5
Узбекистан	—	18	—	—	18
Таджикская ССР	—	1	—	—	1
Молдавская АССР	—	3	—	—	3
Итого по СССР	26	569	28	3	626

Общая мощность станций по пяти разделам таблицы к концу 1929 года в квт.

821 880 321 500 128 612 24 500 1 296 492

Произведено тысяч киловатт часов применительно к пяти разделам таблицы:

а) тепловыми станциями	1 929 623	640 865	252 052	10 691	2 833 231
б) гидростанциями	389 379	51 565	—	—	440 944
Всего	2 319 002	692 430	252 032	10 691	3 274 175

Наиболее крупными потребителями энергии являются промышленные центры. Так, например, за первое полугодие 1929/30 операционного года электрические станции отдельно или по объединению имели следующие максимумы в киловаттах: МОГЭС (6 станций) — 264 900, Лгр. Электроток (6 станций) — 159 170, Бакин. Электроток (2 станции) — 67 700, НИГРЭС — 40 100, кольцо центр. района Донбасса — 18 675, Сталино-Макеевское кольцо Донбасса — 36 000.[1] Значительный рост потребления электрической энергии, сопровождаемой и ростом максимума, заставляет форсировать строительство электрических станций. В числе станций, намеченных к постройке по пятилетнему плану укажем следующие: Нижне-Свирская (80 квт), Новая Ленинградская торфяная (300 квт), Бобриковская (150 квт), Каширская (200 квт), Саратовская (33 квт), Сталинградская (66 квт), Новая Волжская (50 квт), Челябинская (134 квт), Новая на р. Урале (44 квт), гидравлическая станция на Камско-Печорском соединении (150 квт), Кузнецкая (300 квт), Алтайская (60 квт), Кемеровская (200 квт), Туркестанская на р. Чирчик (200 квт), Несветаевская (44 квт), Шахтинская (66 квт), Минераловодская на р. Баксан (25 квт), Сулакская (110 квт), Зуевская (100 квт), Штеровская (152 квт), Днепровская (568 квт), Ирпинская (44 квт), Осиновская (33 квт), Рионская (42 квт), Аджарисцкали (30,5 квт), Грузинская (60 квт), Бакинская (140 квт). Часть перечисленных станций будет закончена на полную мощность в настоящую пятилетку, часть будет иметь неполную мощность, часть станций будет лишь начата постройкой. В общем в пятилетнем плане список станций насчитывает 55 районных станций, включая и станции, подлежащие расширению. В результате все районные станции вместо 607,5 тысяч киловатт общей мощности будут иметь по пятилетнему плану на 1 декабря 1932 года свыше 3 000 000 квт. Следовательно увеличение мощности будет более чем в пять раз.[2]

Рост потребления энергии, развитие электрификации различных областей хозяйства СССР заставляет и нашу электротехническую промышленность перестраиваться, учитывая все возрастающую потребность в электроматериалах, машинах, аппаратуре и различных принадлежностях. Наши электротехнические заводы, обслуживающие технику сильных токов, связь проволочную и беспроволочную, перестраиваются; усиливают свое оборудование с таким расчетом, чтобы своей продукцией удовлетворить нужды государства и сократить до минимума импорт электротехнических изделий. Так, например, на заводе «Электросила» в Ленинграде

[1] См. журнал „Электричество", 1930 г., № 10.
[2] См. журнал „Элект[illegible] 930 [illegible] юбилейный сборник.

строят мощные генераторы для электрических станций, трансфо маторы, ртутные выпрямители, электродвигатели серийного ти и др. машины. На заводе «Динамо» в Москве изготовляет тяговое, моторное и аппаратное оборудование, необходимое в свя с созданием у нас новых трамвайных установок, расширени существующих и с переводом отдельных железнодорожных пр городных линий на электрическую тягу. Вновь построенн гигант электротехнической промышленности «Электрозаво в Москве будет изготовлять трансформаторы, аппаратуру д низкого и высокого напряжения, специальное электрообору вание для автомобилей и тракторов, осветительную арматуру т. д. В Москве же сооружается и новая ламповая фабри Завод «Электроприбор» в Ленинграде изготовляет измерительн приборы, включая счетчики.

Завод «Электрик» в Ленинграде изготовляет сварочные машин трансформаторы и аппаратуру для сварки, различный электр установочный материал, в частности — пусковую аппаратуру д асинхронных двигателей трехфазного тока, и нагревательн приборы, избрав, таким образом, себе в качестве основной сп циальности электротермию. В области связи мы имеем собстве ную продукцию для автоматических телефонных станций, не гово уже о телефонных станциях, обслуживаемых персоналом, ра личные изделия для радиотехники, для телеграфной связи.[1] Осв бождение от «иностранного плена» идет у нас и в ряду так малозаметных для широких кругов областей, как производст рентгеновских аппаратов.

Мы остановились лишь на некоторых заводах, взяв их к иллюстрацию. Перечень их, конечно, далеко не полный. Но и э наша справка о строительстве станций, о все растущем потр блении энергии и о развитии электротехнической промышленнос служит показателем того, какое обширное поле деятельнос предстоит товарищам, избравшим в СССР электротехнику сво специальностью.

---

[1] См. № 3 журнала „СССР на стройке".